

44912-2077100-00000

DELPHION

Select CR

RESEARCH

PRODUCTS

INSIDE DELPHION

Log Out Work Files Saved Searches

My Account

Search: Quick/Number Boolean Advanced Derwent

Help

Derwent Record

Email this to a friend

View: Expand Details Go to: Delphion Integrated View

Tools: Add to Work File: Create new Work File Add

Derwent Title: Mixture regulation method for internal combustion engine - measures air and fuel feed volumes and value differentials, to create learning cycle for repeat processes

Original Title: DE19706750A1: Verfahren zur Gemischsteuerung bei einem Verbrennungsmotor sowie Vorrichtung zu dessen Durchfuehrung

Assignee: SCHROEDER D Individual

Inventor: LENZ U; SCHROEDER D;

Accession/Update: 1998-457752 / 200340

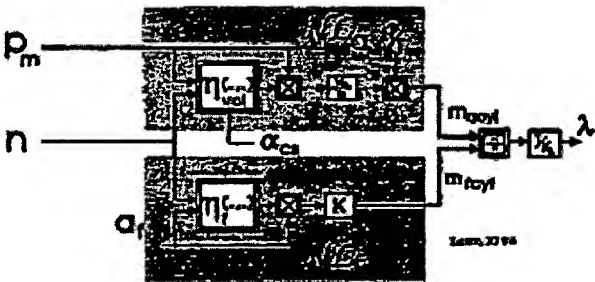
IPC Code: F02D 41/00 ; F02D 41/14 ; F02D 41/26 ;

Derwent Classes: Q52; X22;

Manual Codes: X22-A03A2A(Air-fuel ratio)

Derwent Abstract: (DE19706750A) A value is measured, which is related to the air volume fed into the combustion chamber of the engine, e.g. an input value. An output value to determine the fuel volume to be supplied, is determined dependent upon the input value and stored information, and that volume is supplied. A value is measured, which gives information regarding the mixture, e.g. actual value, and this is compared to a reference value for the volume. The stored information is altered dependent upon the calculated value differential, for the engine condition during calculation of the input value. This causes the deviation to be reduced, when the previous stages are repeated. The whole process presents a 'learning cycle'. Use - Regulation of fuel-air mixture internal combustion engine. Advantage - Conforms to strict exhaust emission rules.

Images:




Dwg.1/16

Family:	PDF Patent	Pub. Date	Derwent Update	Pages	Language	IPC Code
	<input checked="" type="checkbox"/> DE19706750A1	* 1998-08-27	199840	21	German	F02D 41/00
	Local appls.: DE1997001006750 Filed:1997-02-20 (97DE-1006750)					
	<input checked="" type="checkbox"/> DE59808282G	= 2003-06-12	200340		German	F02D 41/14
	Local appls.: Based on EP00966600 (EP 966600)					
	Based on WO09837321 (WO 9837321)					
	EP1998000913572 Filed:1998-02-20 (98EP-0913572)					
	DE1998000508282 Filed:1998-02-20 (98DE-0508282)					

BEST AVAILABLE COPY

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

WO1998EP0001001 Filed:1998-02-20 (98WO-EP01001)


 EP0966600B1 = 2003-05-07 200333 36 German F02D 41/14

Des. States: (R) DE FR GB IT

Local appls.: Based on WO09837321 (WO 9837321)

EP1998000913572 Filed:1998-02-20 (98EP-0913572)

WO1998EP0001001 Filed:1998-02-20 (98WO-EP01001)


 EP0966600A1 = 1999-12-29 200005 German F02D 41/14

Des. States: (R) DE FR GB IT

Local appls.: Based on WO09837321 (WO 9837321)

EP1998000913572 Filed:1998-02-20 (98EP-0913572)


WO1998EP0001001 Filed:1998-02-20 (98WO-EP01001)


 WO9837321A1 = 1998-08-27 199840 55 German F02D 41/14

Des. States: (N) JP KR US

(R) AT BE CH DE DK ES FI FR GB GR IE IT LU MC NL PT SE

Local appls.: WO1998EP0001001 Filed:1998-02-20 (98WO-EP01001)

 INPADOC Legal Status: [Show legal status actions](#)

 First Claim: [Show all claims](#) 1. Verfahren zur Gemischsteuerung bei einem Verbrennungsmotor, das folgende Schritte umfaßt:

- a) Messen wenigstens einer Größe, mit der die in einen Brennraum des Verbrennungsmotors gelangende Luftmasse im Zusammenhang steht (sog. Eingangsgröße);
- b) Ermitteln wenigstens einer die zuzuführende Kraftstoffmenge steuernde Ausgangsgröße in Abhängigkeit von wenigstens der/den in a) gemessenen Eingangsgröße/n, mit Hilfe gespeicherter Abbildungsinformation;
- c) Zuführen der Kraftstoffmenge entsprechend der Ausgangsgröße aus b);
- d) Messen einer Größe, die Information über das so entstandene Gemisch trägt (sog. Istgröße);
- e) Ermitteln einer Abweichung der in d) gemessenen Istgröße von einem Sollwert für diese Größe;
- f) Verändern der gespeicherten Abbildungsinformation in Abhängigkeit von der in e) ermittelten Abweichung für den in a) gemessenen Betriebszustand, so daß bei einem zukünftigen Durchlaufen der Schritte a) bis e) im gleichen Betriebszustand die Abweichung kleiner wird; und das damit einen Lernprozeß realisiert.

 Priority Number:

Application Number	Filed	Original Title
DE1997001006750	1997-02-20	

 Title Terms: MIXTURE REGULATE METHOD INTERNAL COMBUST ENGINE MEASURE AIR FUEL FEED VOLUME VALUE DIFFERENTIAL LEARNING CYCLE REPEAT PROCESS

[Pricing](#) [Current charges](#)

**Derwent Searches:** [Boolean](#) | [Accession/Number](#) | [Advanced](#)

Data copyright Thomson Derwent 2003

**THOMSON**

Copyright © 1997-2004 The Thomson Corporation

[Subscriptions](#) | [Web Seminars](#) | [Privacy](#) | [Terms & Conditions](#) | [Site Map](#) | [Contact Us](#) | [Help](#)

**THIS PAGE BLANK (USPTO).**

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 197 06 750 A 1

21 Aktenzeichen: 197 06 750.6  
22 Anmeldetag: 20. 2. 97  
43 Offenlegungstag: 27. 8. 98 ✓

51 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
F 02 D 41/00  
F 02 D 41/14  
F 02 D 41/26

DE 197 06 750 A 1

71 Anmelder:  
Schröder, Dierk, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h.c., 80333  
München, DE  
74 Vertreter:  
von Samson-Himmelstjerna und Kollegen, 80538  
München

72 Erfinder:  
Antrag auf Nichtnennung

56 Entgegenhaltungen:

DE 35 90 028 C2  
DE 35 05 965 A1  
DE 34 08 215 A1

Dissertation von Markus Schröder: "Optimierung  
kennfeldbasierender Regelstrukturen mit Hilfe  
von verallgemeinernden Genetischen  
Algorithmen"  
(TU Braunschweig 13.1.97);

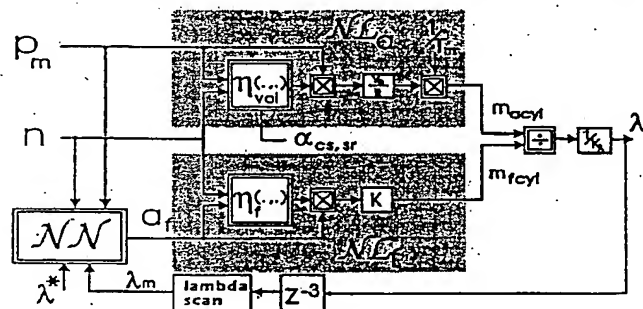
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren zur Gemischsteuerung bei einem Verbrennungsmotor sowie Vorrichtung zu dessen Durchführung

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Gemischsteuerung bei einem Verbrennungsmotor, das folgende Schritte umfaßt:

- Messen wenigstens einer Größe, mit der die in einen Brennraum des Verbrennungsmotors gelangende Luftmasse im Zusammenhang steht (sog. Eingangsgröße);
  - Ermitteln wenigstens einer die zuzuführende Kraftstoffmenge steuernde Ausgangsgröße in Abhängigkeit von wenigstens der/den in a) gemessenen Eingangsgröße/n, mit Hilfe gespeicherter Abbildungsinformation;
  - Zuführen der Kraftstoffmenge entsprechend der Ausgangsgröße aus b);
  - Messen einer Größe, die Information über das so entstandene Gemisch trägt (sog. Istgröße);
  - Ermitteln einer Abweichung der in d) gemessenen Istgröße von einem Sollwert für diese Größe;
  - Verändern der gespeicherten Abbildungsinformation in Abhängigkeit von der in e) ermittelten Abweichung für den in a) gemessenen Betriebszustand, so daß bei einem zukünftigen Durchlaufen der Schritte a) bis e) im gleichen Betriebszustand die Abweichung kleiner wird;
- und das damit einen Lernprozeß realisiert. Die Erfindung ist auch auf eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens gerichtet.



DE 197 06 750 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Gemischsteuerung bei einem Verbrennungsmotor sowie eine Vorrichtung zu dessen Durchführung.

Die Gemischsteuerung spielt nicht nur eine wichtige Rolle für das Betriebsverhalten eines Verbrennungsmotors, sondern ist entscheidend für die Erzielung geringerer Emissionen von schädlichen Abgasen. So überführt der bei Ottomotoren übliche Dreiwegekatalysator nur dann zufriedenstellend schädliche Abgase (insbesondere Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Stickoxide) in unschädliche Reaktionsprodukte, wenn der Sogenannte Lambdawert ( $\lambda$ ) des Gemisches innerhalb sehr enger Grenzen bei  $\lambda=1$  (stöchiometrisches Verhältnis) liegt. Auch bei Dieselmotoren müssen zur Erzielung geringer Emissionen und hoher Wirkungsgrade bestimmte variable Gemischverhältnisse sehr genau erreicht werden. Angesichts der zunehmenden Probleme im Bereich der Luftreinhaltung und der immer strenger werdenden Emissionsschutzbestimmungen kommt der Gemischsteuerung daher eine wichtige Rolle zu.

Bei den herkömmlichen Systemen erfolgt die Einstellung des Gemisches i. a. durch Vorsteuerung und eine überlagerte Regelung. Und zwar wird z. B. über eine im Abgasstrom angeordnete Lambdasonde der verbleibende Restsauerstoffgehalt im Abgas gemessen. Der gewünschte stöchiometrische Wert des Luft-Kraftstoffgemisches (d. h.  $\lambda=1$ ) führt zu einem bestimmten Restsauerstoffgehalt. Beim Abweichen von  $\lambda=1$  zeigt sich demgegenüber ein größerer oder kleinerer Restsauerstoffgehalt. Die Lambdasonde erzeugt ein entsprechendes Ausgangssignal. Dieses dient als Istwert für einen PI-Regler, der die einzuspritzende Kraftstoffmenge dahingehend verändert, daß das stöchiometrische oder ggf. ein anderes gewünschtes Mischungsverhältnis eingehalten wird. Um die bei einer Regelung im herkömmlichen Sinn unvermeidliche Regeldifferenz möglichst klein zu halten, erfolgt durch Verwendung von statischen Kennfeldern eine betriebspunktabhängige z. B. von der Drosselklappenstellung und der Drehzahl abhängige Vorsteuerung der Einspritzmenge. Die Kennfelder werden beim Motorenhersteller in umfangreichen Test auf Prüfständen ermittelt. Dabei werden Mittelwerte im Kennfeld abgelegt, um die Serienstreuung der für die Verbrennung ausschlaggebenden Motorparameter auszugleichen. Solange noch kein Regelsignal vorliegt, verwendet die Gemischregelung den im Kennfeld vorgegebenen Wert für die Einspritzmenge. Aufgrund der mehrere Arbeitstakte betragende Totzeit (bis sich nämlich eine bestimmte Einspritzmenge im Abgas am Ort der Lambdasonde bemerkbar macht) ist es dieser Regelung nicht möglich, nach Last- oder Drehzahländerungen das gewünschte Mischungsverhältnis einzuhalten. In der Praxis wird aus diesem Grund während Beschleunigungs- und Abbremsphasen die Lambda-Regelung gänzlich inaktiviert; die Einspritzmenge wird dann nur mit Hilfe des Kennfeldes gesteuert. Bei dynamischem Fahrbetrieb kommt es daher insgesamt betrachtet zu erheblichen Abweichungen von dem Lambda-Sollwert, was zu entsprechend hohen Schadstoffemissionen führt. Strenge Abgasbestimmungen lassen sich damit nicht oder nur unter Schwierigkeiten einhalten.

In der Veröffentlichung U. Lenz und D. Schröder: Artificial Intelligence for Combustion Engine Control, SAE-Paper Nr. 960328, Februar 1996 wird ein Verfahren zur Bestimmung der in einen Zylinder eingesaugten Luftmasse vorgeschlagen. Die Veröffentlichung U. Lenz und D. Schröder: Identifikation isolierter Nichtlinearitäten mit Neuronalen Netzen, GMA Fachausschuß 1.4 "Theoretische Verfahren der Regelungstechnik", Workshop in Interlaken, 1996, betrifft allgemein einen sogenannten Beobachteransatz auf der Grundlage eines Neuronalen Netzes. In diesen Veröffentlichungen wird ein Verfahren der künstlichen Intelligenz, einsetzbar zur Regelung von Verbrennungsmotoren, beschrieben, welches einen "indirekten" Regelungsansatz durch Gewinnung von Wissen darstellt. (Vorweg sei bemerkt, daß die vorliegende Erfindung im Gegensatz dazu ein neuartiges Verfahren der Künstlichen Intelligenz lehrt, das einen "direkten" Regelungsansatz darstellt, indem das Verfahren das Steuerungsgesetz "lernt").

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren bereitzustellen, mit dem obige Nachteile vermieden oder zumindest gemindert werden, so daß auch strenge Abgasnormen erfüllt werden können. Dazu gehört auch die Bereitstellung einer entsprechenden Vorrichtung.

Diese Aufgabe wird gelöst durch das Verfahren zur Gemischsteuerung gemäß Anspruch 1, welches folgende Schritte umfaßt:

- a) Messen wenigstens einer Größe, mit der die in einen Brennraum des Verbrennungsmotors gelangende Luftmasse im Zusammenhang steht (sog. Eingangsgröße);
- b) Ermitteln wenigstens einer die zuzuführende Kraftstoffmenge steuernde Ausgangsgröße in Abhängigkeit von wenigstens der/den in a) gemessenen Eingangsgröße/n, mit Hilfe gespeicherter Abbildungsinformation;
- c) Zuführen der Kraftstoffmenge entsprechend der Ausgangsgröße aus b);
- d) Messen einer Größe, die Information über das so entstandene Gemisch trägt (sog. Istgröße);
- e) Ermitteln einer Abweichung der in d) gemessenen Istgröße von einem Sollwert für diese Größe;
- f) Verändern der gespeicherten Abbildungsinformation in Abhängigkeit von der in e) ermittelten Abweichung für den in a) gemessenen Betriebszustand, so daß bei einem zukünftigen Durchlaufen der Schritte a) bis e) im gleichen Betriebszustand die Abweichung kleiner wird;

und das damit einen Lernprozeß realisiert. Dieser umfaßt sowohl die stationären als auch die dynamischen Betriebszustände.

Hierbei wird der Begriff "Messen" in einem weiten Sinn verstanden, welcher die eigentliche physikalische Messung und ggf. die Ableitung einer Größe hieraus umfaßt. Die Meßgröße kann also eine unmittelbar gemessene Größe oder eine daraus abgeleitete Größe sein. Beispielsweise kann der Meßwertaufnehmer für die Istgröße eine Lambdasonde sein, welche ein dem Restsauerstoffgehalt des Abgases entsprechendes Signal abgibt. Das "Messen" kann in diesem Beispiel zusätzlich zur Gewinnung dieses Signals auch die Ermittlung des Restsauerstoffgehalt und ggf. daraus die Ermittlung des Lambdawerts umfassen. Die i. a. interessierende Gemischgröße ist das Gemischverhältnis (d. h. der Lambdawert). Es ist möglich, eine Gemischgröße direkt zu messen oder eine Messung einer Abgasgröße vorzunehmen, die einen Rückschluß auf die interessierende Gemischgröße (z. B. der Lambdawert) erlauben.

Kurz gesagt lehrt die Erfindung also eine lernende Gemischsteuerung, welche das tatsächlich enthaltene Gemischver-

hältnis mit einem Sollwert vergleicht und bei einer Abweichung hiervon die gespeicherte Steuerinformation dahingehend adaptiert, daß bei zukünftigem Durchlaufen des gleichen oder ähnlichen Betriebspunkts eine geringere Abweichung erreicht wird. Der erfindungsgemäße Lernprozeß erzeugt dabei eine genaue Abbildung der realen Verhältnisse unter allen relevanten Betriebsbedingungen, aus der dann die Steuerinformation zur Vermeidung jeglicher Regeldifferenz abgeleitet wird; dies gilt insbesondere auch für den dynamischen Betrieb des Verbrennungsmotors. Es geht also darum, z. B. mit Methoden der Künstlichen Intelligenz aus Fehlern zu lernen, um diese in Zukunft zu vermeiden.

Im folgenden wird die Gemischbildung näher erläutert:

Bei Kolbenmotoren werden Leistung, Verbrauch und Emission in entscheidendem Maße durch das Gemischverhältnis (auch Luftzahl)  $\lambda$  beeinflusst. Dieses Gemischverhältnis  $\lambda$  ist definiert als Verhältnis von im Motorzylinder (Brennraum) befindlicher Luftmasse ( $m_{\text{acyl}}$ ) und Kraftstoffmasse ( $m_{\text{fcyl}}$ ),

$$\lambda = \frac{m_{\text{acyl}}}{K_{\lambda} m_{\text{fcyl}}} \quad (1)$$

wobei  $K_{\lambda}$  der Faktor zur stöchiometrischen Verbrennung ist ( $K_{\lambda} = 14.7$  für Benzin). Aufgabe der Motorsteuerung ist es daher, das Gemischverhältnis in Abhängigkeit vom Betriebspunkt nach obigen Kriterien optimal einzustellen. Beispielsweise ist für einen emissionsoptimalen Betrieb eines Ottomotors mit Dreifach-Katalysator eine Luftzahl von  $\lambda = 1.00$  zu erzielen, was einem exakt stöchiometrischen Gemischverhältnis entspricht. Dieselmotore dagegen werden mit variablem, magerem Gemisch betrieben, d. h. mit einem  $\lambda$  größer als eins; bei Vollast wird das Gemisch bis hinunter zur sogenannten Rauchgrenze bei etwa  $\lambda = 1.5$  angefeuert.

Die folgende Darstellung der Gemischbildung bezieht sich beispielhaft auf Verbrennungsmotoren mit Direkteinspritzung. Wie weiter unten ausgeführt wird, ist die Erfindung auch bei anderen Motoren vorteilhaft einsetzbar.

Seit geraumer Zeit ist die Direkteinspritzung bei Dieselmotoren bekannt. Hierzu zählen auch Dieselmotoren mit Vor- oder Wirbelkammer, wenn diese effektiv Teil des Brennraums sind. Benzindirekteinspritzung für Ottomotoren ist bereits vor mehr als 50 Jahren einmal in Serienfertigung gewesen, Daimler Benz Militär-Flugmotoren waren mit einer mechanischen Direkteinspritzung ausgerüstet. Nach dem 2. Weltkrieg wurde eine mechanische Benzindirekteinspritzung im Mercedes-Seriensportwagen 300 SL und Lloyd-Kleinwagen eingesetzt, aber letztendlich war der mechanische Aufwand unrentabel. Angesichts der steigenden Umweltschutzanforderungen, sind solchen Motoren, von denen man geringen Kraftstoffverbrauch erwartet, wieder aktuell.

Der Vorteil der Direkteinspritzung liegt im Vergleich etwa zu einem konventionellen Saugrohrmotor in der exakten Zumessung des Kraftstoffs ohne den dynamischen Speichereffekt durch die dortige sog. Wandfilmbildung.

Es wird erwartet, daß der Wirkungsgrad von Ottomotoren im Teillastbereich neben der Benzindirekteinspritzung durch den Ersatz der Drosselklappe mittels unabhängig steuerbarer Einlaßventile (hydraulisch, elektromagnetisch) gesteigert werden kann.

Nachfolgend wird die Gemischbildung beispielhaft bei verschiedenen direkteinspritzenden Kolben-Verbrennungsmotoren mathematisch beschrieben.

Das Gemischverhältnis  $\lambda$  beim Kolben-Verbrennungsmotor wird bestimmt durch die Luft- und die Kraftstoffmasse im Zylinder. Günstig ist daher die Betrachtung der Gemischbildung als Schnittpunkt zweier Pfade, des Luft- und des Kraftstoffpfades.

Zunächst soll das Ansaugverhalten, der sog. Luftpfad beschrieben werden: Der Motor saugt bei offenen Einlaßventilen und Hinunterlaufen des Kolbens Frischluft aus dem Saugrohr an. Infolge des sogenannten choked-flow-Effektes kann die Einstromgeschwindigkeit der Luft durch die Einlaßventile in die Zylinder maximal Schallgeschwindigkeit erreichen. Dadurch kann während der mit zunehmender Drehzahl kürzer werdenden Ansaugtakt kein vollständiger Druckausgleich zwischen Saugrohr und Zylinder erfolgen; der Zylinder enthält also weniger Luftmasse als bei dem thermodynamischen Saugrohrzustand entsprechend seinem Volumen möglich wäre. Vor diesem Hintergrund kann das Ansaugverhalten des Motors mathematisch als eine Pumpe mit nichtlinearem Wirkungsgrad beschrieben werden, die pro Ansaugtakt in den Zylinder gelangte Luftmasse ( $m_{\text{acyl}}$ ) ergibt sich zu

$$m_{\text{acyl}} = \eta_{\text{vol}} V_D \frac{p_m}{RT_m} \quad (2)$$

mit:

$T_m$  = Temperatur der Luftmasse

$p_m$  = Druck der Luftmasse

$V_D$  = Hubvolumen eines Zylinders

Der dimensionslose Wirkungsgrad "volumetrische Effizienz"  $\eta_{\text{vol}}$  ist bei Motoren mit Drosselklappe (Ottomotor, konventionell, Sauger oder Turbo) nichtlinear abhängig vom Saugrohrdruck und der Drehzahl des Motors (welche die Zeitdauer des Ansaugtaktes bestimmt), also

$$\eta_{\text{vol}} = \eta_{\text{vol}}(p_m, n) \quad (3)$$

oder

$$\eta_{\text{vol}} = \eta_{\text{vol}}(p_m, n, \alpha_{\text{cs}}) \quad (4)$$

oder

$$\eta_{vol} = \eta_{vol}(p_m, n, \alpha_{sr}) \quad (5)$$

falls der Motor mit einer um  $\alpha_{cs}$  verstellbaren Nockenwelle oder mit einem Schaltsaugrohr ( $\alpha_{sr}$ ) (d. h. einem in der wirk-  
samen Länge verstellbaren Saugrohr) ausgerüstet ist.

Werden die Einlaßventile unabhängig von einer Nockenwelle angetrieben, das heißt, die Laststeuerung geschieht z. B. über das Tastverhältnis  $a_a$  der Einlaßventilöffnung, so wird die volumetrische Effizienz bestimmt durch eben dieses Tastverhältnis und die Drehzahl, also

$$\eta_{vol} = \eta_{vol}(a_a, n) \quad (6)$$

Nach Gleichung 2 wird die nach dem Ansaugtakt im Zylinder befindliche Luftmasse auch bestimmt durch den Druck und die Temperatur im Saugrohr. Ist der Motor nicht mit einer Drosselklappe ausgerüstet, so entsprechen diese thermodynamischen Zustände denen der Umgebung, es kann davon ausgegangen werden, daß diese nur langsam schwanken, mit einer Adaption kann auf die Messung beider Größen verzichtet werden. Wird der Verbrennungsmotor dagegen gedrosselt betrieben, so sind beide Größen schnell veränderlich, dann können z. B. außerdem Druck und ggf. Temperatur im Saugrohr gemessen werden, um die Luftmasse in den Zylinder zu bestimmen. Für die pro Arbeitsspiel in den Brennraum eingesaugte Luftmasse ergibt sich also die nichtlineare Abhängigkeit

$$NL_a = m_{acyl} = \eta_{vol} V_D \frac{p_m}{RT_m} \quad (7)$$

mit der volumetrischen Effizienz in Abhängigkeit von Saugrohrdruck und Drehzahl oder Tastverhältnis und Drehzahl. Bei Schaltsaugrohren oder variabler Nockenwellensteuerung tritt zudem noch die Abhängigkeit der volumetrischen Effizienz von diesen Steuergrößen auf.

Im folgenden wird die Kraftstoffeinspritzung, der sog. Kraftstoffpfad beschrieben:

Analog zum Ansaugverhalten kann die Kraftstoffeinspritzung mittels eines Wirkungsgrades beschrieben werden. Würde ideales trägheitsloses Öffnen und Schließen der Einspritzventile und stets gleichbleibender Benzinversorgungsdruck angenommen, so würde sich die pro Arbeitsspiel in den Zylinder eingespritzte Kraftstoffmasse beim Tastverhältnis  $a_f$  berechnen zu

$$m_{fcyl} = K a_f \quad (8)$$

mit einer Konstanten K, bestimmt durch Ventilöffnungsquerschnitt und Kraftstoffversorgungsdruck. Durch die Dynamik der Ventildadeln und einen geringen Versorgungsdruckverlust vor den Ventilen wird jedoch auch hier zur Beschreibung ein Wirkungsgrad  $\eta_f$  eingeführt werden. Dieser Wirkungsgrad hängt nichtlinear von der Öffnungsdauer ab, also vom Tastverhältnis der Einspritzventile  $a_f$  und der Ansteuerfrequenz  $1/n$ . Damit ergibt sich die nichtlineare Abhängigkeit

$$NL_f = m_{fcyl} = \eta_f(a_f, n) K a_f \quad (9)$$

für die pro Arbeitsspiel in den Zylinder eingespritzte Kraftstoffmasse.

Nach Gleichung 1 und den obenstehenden Ableitungen zum Luftpfad und dem Kraftstoffpfad ist das Gemischverhältnis (die Luftzahl  $\lambda$ ) somit bestimmt zu

$$\lambda = \frac{m_{acyl}}{14.7 m_{fcyl}} = \frac{NL_a}{K_\lambda NL_f} \quad (10)$$

In Fig. 1 wird dieser Zusammenhang beispielhaft für einen Kolben-Verbrennungsmotor mit konventioneller Einlaßventilsteuerung verdeutlicht. Und zwar zeigt Fig. 1 einen "Signalflußplan" für die Bildung des Gemischverhältnis bei direkteinspritzenden Kolben-Verbrennungsmotoren mit konventioneller Einlaßventilsteuerung. Die zusätzliche (dünn eingezeichnete) Abhängigkeit  $\eta_{vol} = f(\dots, \alpha_{cs})$  gilt für Motoren mit variabler Nockenwelle (Otto- und Dieselmotoren). Dabei gilt beispielsweise für einen freisaugenden Dieselmotor  $p_m \approx p_0$  ( $p_0$  = Umgebungsdruck) oder für einen gedrosselten Ottomotor  $p_m \leq p_0$ . Bei Turbomotoren kann der Saugrohrdruck auch den Umgebungsluftdruck überschreiten. Ist der betrachtete Kolben-Verbrennungsmotor statt mit einer konventionelleren Einlaßventilsteuerung mit unabhängig angetriebenen Einlaßventilen ausgerüstet, so hängt die volumetrische Effizienz z. B. vom Tastverhältnis  $a_a$  und der Drehzahl  $n$  ab. Die Laststeuerung kann dann durch Variation des Tastverhältnisses geschehen, der Motor saugt ungedrosselt an. Das Gemischverhältnis wird dann z. B. gemäß der Veranschaulichung der Fig. 2 gebildet, die einen "Signalflußplan" für die Bildung des Gemischverhältnis bei direkteinspritzenden Kolben-Verbrennungsmotoren mit nockenwellenloser Einlaßventilsteuerung zeigt.

Beim Betrieb des Verbrennungsmotors besteht nun allgemein die Aufgabe, durch eine Steuerung bzw. Regelung ein gewünschtes Gemischverhältnis einzustellen. Dieses Gemischverhältnis ist bestimmt aus dem Quotient von Luft- und Kraftstoffmasse im Zylinder. Sowohl Luft- als auch Kraftstoffmasse im Zylinder sind nicht meßbar und auch nicht ohne großen Aufwand (z. B. durch Kalibrierung, Zeitvarianz) durch Variation der Steuergrößen  $p_m$  oder  $a_a$ , und  $a_f$  einstellbar. Jedoch ist die angesaugte Luftmasse oder die eingespritzte Kraftstoffmasse – bei dem hier beispielhaft näher erläuterten Direkteinspritzer – immer gleich für gleiche Steuergrößen bei gleichen Motorbetriebspunkten, wenn die Zeitvarianz infolge von Alterung oder z. B. langsamen Zusetzen eines Ventils vernachlässigt wird. Sowohl  $NL_a$  und  $NL_f$  sind also hier



statische (ggf. zeitvariante) Nichtlinearitäten und nur durch eine aufwendige Kalibrierung bestimmbar. Das Gemischverhältnis kann gemessen werden: neuartige Verfahren beruhen auf der Interpretation des Ionisierungsstromes bei der elektrischen Funkenzündung (beim Ottomotor), konventionell jedoch ist die Messung mittels schneller schaltender Lambda-Sonde. Der Messung mittels einer Lambda-Sonde (z. B. Breitband-Lambda-Sonde oder Sonde mit sprungförmigem Verlauf der SONDENSPANNUNG bei  $\lambda=1$ ) im Auspuffkrümmer (sog. Hosenrohr) geht jedoch eine durch das Verbrennungsmotorische Arbeitsverfahren bedingte drehzahlabhängige Totzeit voraus.

Aus den obigen Erläuterungen wird klar, daß die für erfindungsgemäße Verfahren vermittelte Abbildung von der Luftmassengröße (Eingangsgröße) auf die Kraftstoffmengengröße (Ausgangsgröße) zwei nicht genau vorherbestimmbare nichtlineare Funktionen umfaßt, nämlich die des Luft- und des Kraftstoffpfades. Zur Vereinfachung wurde dabei beispielhaft auf direkteinspritzende Motoren Bezug genommen. Wie unten näher erläutert wird, ist das erfindungsgemäße Verfahren auch auf nicht direkteinspritzende Motoren anwendbar, die einen sog. Kraftstoffspeichereffekt aufweisen.

Erfindungsgemäß wird die a priori nicht genau bekannte Abbildung nicht – wie im Stand der Technik – durch eine Regelung vermittelt, sondern durch eine lernende Steuerung. Das Lernen kann im laufenden Betrieb erfolgen, bei dem die verschiedenen, in der Praxis vorkommenden Betriebspunkte (ein solcher kann z. B. ein Tupel eines Drehzahlwerts und eines Saugrohrdruckwerts sein) durchlaufen werden. Das erfindungsgemäße Verfahren wird hierbei in jedem relevanten, d. h. erreichbaren Betriebspunkt durchgeführt. Nachdem alle Betriebspunkte mehrmals durchlaufen worden sind – was im Normalbetrieb i. a. relativ schnell erzielt wird – ist die Gesamtabbildung für alle möglichen Werte der Eingangsgröße gelernt.

Nach dem Anlernen liefert die Steuerung dann im laufenden Betrieb instantan – d. h. ohne jede Regelverzögerung – mit hoher Genauigkeit den richtigen Wert der Ausgangsgröße, und zwar auch nach einer Änderung des Betriebspunkts. Vorteilhaft wird der Lernprozeß laufend weiter ausgeführt, um eine laufende Adaption an Störgrößen zu ermöglichen, welche nicht als Eingangsgrößen erfaßt werden. Hierbei kann es sich zum Beispiel um verschleißbedingte Änderungen, Änderungen der Ansauglufttemperatur, der Kühlwassertemperatur, des äußeren Luftdrucks, des Sauerstoffgehalts der Luft etc. handeln.

Das erfindungsgemäße Verfahren ist in der Lage, nach dem Lernen der Abbildung das Anfahren neuer Betriebspunkte ohne jegliche  $\lambda$ -Deviation sicherzustellen. Bei herkömmlichen Regelungsansätzen tritt im Gegensatz dazu immer eine Regeldifferenz auf, die dann beispielsweise durch einen integrierenden Anteil im Regler solange zu einer Steuergröße aufintegriert wird, bis die Differenz zu null geworden ist.

Die Erfindung hat damit folgende Vorteile:

- aufgrund der Selbstadaption der Abbildungsinformation verringern sich die Anforderungen an die Genauigkeit, mit der die Abbildungsinformation für das Gemischsteuerungskennfeld vorbekannt sein muß. Dies reduziert den Aufwand für die Entwicklung einer Motorsteuerung und die Serienentwicklung beträchtlich;
- das erfindungsgemäße Steuerverfahren ist robust gegenüber Serienstreuungen und zeitlich veränderlichen Störgrößen;
- der gewünschte Lambdawert wird nicht nur im stationären Betrieb, sondern auch nach einem Wechsel des Betriebszustands (Drehzahl und/oder Laständerungen des Motors) ohne Zeitverzögerung mit großer Genauigkeit eingehalten;
- insgesamt ergeben sich damit geringere Abgasemissionen sowie ein geringerer Kraftstoffverbrauch.

Die Erfindung leistet damit einen Beitrag zum Umweltschutz und zum schonenden Umgang mit den begrenzt vorhandenen Ressourcen.

Die Erfindung läßt sich im übrigen auch im Rahmen einer Fehlerdiagnose im laufenden Betrieb einsetzen. Falls nämlich der Grad der erforderlichen Adaption den hinsichtlich üblicher Serienstreuung und Störgrößeneinflüsse übersteigt, läßt sich hieraus auf Fehlerzustände schließen, etwa auf unzulässig hohen Verschleiß oder einen Defekt. Durch entsprechende Auswertung des Adaptionsgrads, etwa durch ein Fahrzeugdiagnosesystem, lassen sich im laufenden Betrieb Motorschäden oder Teilausfälle frühzeitig erkennen.

Grundsätzlich kann das Verfahren so durchgeführt werden, daß eine oder mehrere der Verfahrensschritte a)–f) über mehrere Arbeitsspiele oder Takte eines Zylinders gemittelt durchgeführt werden. Bei einem Mehrzylindermotor mit z. B. einem gemeinsamen Saugrohr und/oder einer gemeinsamen Lambdasonde tragen dann zu den in den Schritten a) und/oder d) gemessenen Größen aufgrund der Mittelung mehrere Zylinder und ggf. mehrere Arbeitsspiele bei. Bevorzugt wird das Verfahren jedoch im Takt mit den Arbeitsspielen der einzelnen Zylinder durchgeführt (Anspruch 2), d. h., die Abfolge der Verfahrensschritte a)–f) wird im Rahmen eines einzelnen Arbeitstaktes eines einzelnen Zylinders jeweils einmal durchgeführt. Demnach erfolgt beispielsweise die Messung im Schritt a) während des Ansaugtaktes eines Zylinders. Im Schritt b) wird die zuzuführende Kraftstoffmenge auf der Grundlage dieser Messung (und ggf. vorausgehender Messungen: näheres hierzu folgt unten) ermittelt. Das Zuführen der Kraftstoffmenge im Schritt c) erfolgt dann z. B. in dem unmittelbar folgenden Kompressionstakt desselben Zylinders, d. h. im selben Arbeitsspiel wie Schritt a) bezogen auf denselben Zylinder. Die folgenden Schritte d)–f) werden i. a. aufgrund von Totzeiteffekten verzögert durchgeführt; sie werden jedoch dem Arbeitsspiel der Schritte a)–c) und dem zugehörigen Zylinder zugeordnet. Grundsätzlich ist es möglich, das Verfahren nicht in jedem Arbeitsspiel, sondern z. B. nur in jedem zweiten, dritten, usw. Spiel durchzuführen. Besonders vorteilhaft ist jedoch eine Ausgestaltung, bei der das Verfahren mit den Schritten a)–f) bei jedem Arbeitsspiel jedes Zylinders einmal abgearbeitet wird.

Der am meisten verbreitete Ottomotor ist ein gedrosselter Motor, welcher üblicherweise durch Verstellen einer vor einem Saugrohr angeordneten Drosselklappe gesteuert wird. Bei einem solchen Motor ist die Eingangsgröße oder – bei mehreren Eingangsgrößen – eine der Eingangsgrößen vorteilhaft der Druck im Saugrohr (Anspruch 3). Dieser Druck bestimmt nämlich wesentlich die Zylinderfüllung. Es kann sich um einen Motor mit oder ohne Aufladung handeln. Bei einem aufgeladenen Motor (z. B. einem Turbo- oder Kompressormotor) kann der Druck im Saugrohr zeitweise oder dauernd über dem Atmosphärendruck liegen.

Manche Motorkonstruktionen machen sich die Dynamik der angesaugten Luft für eine Aufladung zunutze. Bei manchen dieser Konstruktionen ist das Ansaugsystem veränderlich ausgebildet, um die dynamische Aufladung verschiedenen Betriebsbedingungen anpassen zu können (vgl. Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Bosch, 1991, S. 373, "Schalt-Ansaugsysteme"). Beispielsweise kann die wirksame Saugrohrlänge verstellt werden, um akustische Phänomene zur Füllungssteigerung zu nutzen (Stichwort: Resonanzaufladung). Bei diesen Systemen ist vorteilhaft eine die Momentanstellung des Ansaugsystems charakterisierende Größe (z. B. die effektive Saugrohrlänge), die Eingangsgröße bzw. eine der Eingangsgrößen (Anspruch 4).

Eine Weiterbildung des Typs der gedrosselten Motoren weist eine Einlaßventilsteuerung mit verstellbaren Ventilsteuerzeiten auf. Beispielsweise kann durch eine Nockenwellenverstellung eine Verschiebung der Öffnungs- und Schließzeit und/oder eine Veränderung der Öffnungsdauer erzielt werden (siehe Kraftfahrtechnisches Taschenbuch a.a.O. S. 370). In diesem Fall sind vorteilhaft ein oder mehrere Ventilsteuerzeitparameter (z. B. Nockenwellenverdringung und/oder Axialverschiebung) die Eingangsgröße bzw. eine der Eingangsgrößen (Anspruch 5).

Ein anderer Motortyp, der zukünftig große Bedeutung erlangen könnte, weist frei betätigbare (z. B. elektromagnetisch betätigbare) Einlaßventile auf. Ein solcher Motor braucht keine Drosselung mehr aufweisen, er kann vor den Einlaßventilen mit Atmosphärendruck beaufschlagt sein, da die Ventile aufgrund der freien Wählbarkeit der Öffnungs- und Schließzeiten vollständig die Leistungssteuerung des Motors übernehmen können. Vorteilhaft ist das Tastverhältnis und/oder die Schließ- und/oder Öffnungszeit des Einlaßventils eine Eingangsgröße bzw. eine der Eingangsgrößen (Anspruch 6). Das Tastverhältnis ist die auf die Dauer des Einlaßtaktes oder des gesamten Arbeitsspiels bezogene Öffnungsdauer.

Oben wurde bereits erläutert, daß die in den Zylinder gelangende Luftmasse von der Drehzahl des Verbrennungsmotors abhängt. Vorteilhaft ist daher die Drehzahl eine Eingangsgröße bzw. eine der Eingangsgrößen (Anspruch 7).

Wie oben bereits ausgeführt wurde, werden Otto-Motoren mit 3-Wege-Katalysator üblicherweise mit einem konstanten Gemischverhältnis von  $\lambda = 1$  betrieben, Dieselmotoren hingegen mit einem variablen Soll-Gemischverhältnis. Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich mit einer einfachen Ergänzung auch für letztere Betriebsweise, und zwar dadurch, daß, dem Soll-Gemischverhältnis die Rolle einer Eingangsgröße zugewiesen wird (Anspruch 8). Während bei einem Otto-Motor der Eingangsgrößenraum z. B. zweidimensional ist (er wird etwa durch Saugrohrdruck und Drehzahl aufgespannt), kommt bei dieser Ausgestaltung für einen Dieselmotor als z. B. dritte Eingangsgröße das Soll-Gemischverhältnis hinzu, so daß hier ein dreidimensionaler Eingangsgrößenraum aufgespannt wird (etwa durch Saugrohrdruck, Drehzahl und Soll-Gemischverhältnis).

Bevorzugt erfolgt bei dem Verbrennungsmotor die Kraftstoffzufuhr durch Einspritzen. Vorteilhaft ist die die zuzuführende Kraftstoffmenge steuernde Ausgangsgröße dann eine oder mehrere der folgenden Größen: Einspritzdauer, Tastverhältnis der Einspritzventilöffnung, Einspritzdruck, Öffnungsgrad des Einspritzventils (Anspruch 9). Mit dem Tastverhältnis ist auch hier die Öffnungsdauer bezogen auf die Dauer eines Arbeitstakts oder eines Arbeitsspiels gemeint. Der Öffnungsgrad des Einspritzventils kann z. B. über den Hub der Ventilschraube gesteuert werden.

Bei den heute am meisten verbreiteten Otto-Motoren erfolgt die Kraftstoffeinspritzung nicht direkt in die Zylinder, sondern in das innen vorgelagerte Saugrohr. Der Kraftstoff benetzt hier zunächst die Saugrohrwand (sog. Wall-Wetting-Effect) und benötigt dann für den Übergang in die gasförmige Phase eine gewisse Zeit. Als Folge hiervon erreicht nur ein Teil der zu einem Arbeitstakt eingespritzten Kraftstoffmenge in diesem Arbeitstakt den zugeordneten Zylinder. Der übrige Teil wird erst später gasförmig und wird daher bei späteren Arbeitstakten und – bei gemeinsamer Einspritzung für mehrere Zylinder – zum Teil in nicht zugeordneten Zylindern verbrannt. Das erfindungsgemäße Verfahren ist besonders vorteilhaft bei einem Motor einsetzbar, der keinen derartigen Kraftstoffspeichereffekt aufweist da hier keine derartige Verzögerung berücksichtigt zu werden braucht (Anspruch 10). Insbesondere ist dies ein direkteinspritzender Motor. Auch Motoren, bei denen die Einspritzung in eine Vor- oder Nebenkammer erfolgt, weisen keinen Kraftstoffspeichereffekt auf, sofern nach dem Verbrennungstakt praktisch kein Kraftstoff in der Vor- bzw. Nebenkammer verbleibt.

Das Fehlen eines Kraftstoffspeichereffekts erlaubt eine besonders einfache Ausgestaltung des Verfahrens, indem die Ermittlung der Ausgangsgröße/n im Schritt b) nur auf Größen beruht, die zum aktuell durchgeführten Arbeitstakt gehören – also insbesondere auf dem Ergebnis der im unmittelbar vorausgegangenen Schritt a) erfolgten Eingangsgrößenmessung (Anspruch 11).

Das erfindungsgemäße Verfahren ist aber auch vorteilhaft bei Verbrennungsmotoren mit Kraftstoffspeichereffekt einsetzbar. Die bei einem bestimmten Arbeitstakt in einen Zylinder gelangende Kraftstoffmenge hängt hier i. a. auch von der bei vorausgegangenen Takten eingespritzten Kraftstoffmenge ab. Vorzugsweise werden daher bei einem solchen Motor auch Größen aus einem oder mehreren vorhergehenden Arbeitstakten in die Ermittlung der Ausgangsgröße/n im Schritt b) einbezogen (Anspruch 12). Hierbei kann es sich z. B. um die in diesen vorhergehenden Takten eingespritzten Kraftstoffmengen handeln, die sich im aktuellen Takt noch auswirken. Ihre Berücksichtigung erlaubt eine sehr genauere Steuerung der im aktuellen Takt einzuspritzenden Kraftstoffmenge.

Vorteilhaft hat die gespeicherte Abbildungsinformation die Form eines Kennfeldes, welches die Ausgangsgröße/n direkt oder indirekt enthält (Anspruch 13). Ein Kennfeld erhält man beispielsweise, indem man den (i. a. mehrdimensionalen) Eingangsgrößenraum diskretisiert und jeder durch die Diskretisierung gebildeten Eingangsgrößenzelle eine Ausgangsgröße oder – bei einer mehrdimensionalen Abbildung – mehrere Ausgangsgrößen zuordnet. Die Diskretisierung des Eingangsraums muß dabei nicht regelmäßig erfolgen, ebenso muß die Größe der Eingangsgrößenzellen nicht konstant sein. Das Lernen erfolgt hierbei so, daß im Schritt f) die gespeicherten Werte einer oder mehrerer benachbarter Eingangsgrößenzellen entsprechend einer festgestellten Abweichung so verstellt werden, daß bei einem zukünftigen Betrieb in der gleichen Eingangsgrößenzelle eine kleinere Abweichung auftritt.

Besonders bevorzugt erfolgt die Abbildung der Eingangsgröße/n auf die Ausgangsgröße/n sowie die Adaption der gespeicherten Abbildungsinformation durch einen Neuronales-Netz-Algorithmus (Anspruch 14). Infolge der Parallelisierung der Datenverarbeitung in sogenannten, das Netz bildenden Neuronen kann die Verwendung eines Neuronales-Netz-Algorithmus die Berechnungszeit der Ausgangsgröße auf Basis der gespeicherten Abbildungsinformation im Vergleich zu anderen Interpolationsverfahren (z. B. splines, lineare oder polynomiale Interpolation) bei Verwendung angepaßter Hardware erheblich verkürzt werden. Während bei der Verwendung bekannter Interpolationsverfahren schon durch die

Auswahl der Interpolation (eventuell gar nicht vorhandenes) Vorwissen über den zu approximierenden Zusammenhang angesetzt wird, kann ein Neuronales Netz gänzlich ohne diese Vorwissen auskommen. Insbesondere sind Neuronale Netze durch ihren Auswerte- und Adaptionalgorithmus für das vorliegende lernfähige Verfahren sehr vorteilhaft einsetzbar.

Gemäß dieser bevorzugten Ausgestaltung wird also ein Neuronales Netz NN so angesetzt, daß die Steuergröße des Luftpfades (z. B. der Saugrohrdruck) auf die Steuergröße des Kraftstoffpfades solchermaßen abgebildet wird, um so ein gewünschtes Gemischverhältnis zu erreichen. Die Steuergröße des Luftpfades wird auch aus historischer Sicht als die Steuergröße betrachtet, mit der der Fahrer die Leistungsabgabe des Verbrennungsmotors beeinflusst. Das lernfähige Neuronale Netz NN soll dabei in Abhängigkeit von der fahrerbeeinflussten Steuergröße für den Luftpfad und ggf. vom Motorbetriebszustand (z. B. Drehzahl) die Steuergröße, hier z. B.  $a_f$  für den Kraftstoffpfad ausgeben. Der Ausgang des Neuronalen Netzes entspricht also z. B. dem Tastverhältnis der Einspritzventile  $a_f$ , der Eingangsraum des Neuronalen Netzes NN besteht in diesem Beispiel aus Saugrohrdruck  $p_m$  und Motordrehzahl  $n$ , wir schreiben also

$$a_f = NN(p_m, n) \quad (11)$$

Das Ziel der Steuerung ist, für jeden Betriebspunkt ein gewünschtes Kraftstoff-Luft-Verhältnis mit

$$\lambda = \frac{m_{acyl.}}{K_\lambda m_{fcyl.}} \quad (12)$$

zu erreichen. Im weiteren vernachlässigen wir den konstanten Faktor  $K_\lambda$ . Mit dem Neuronalen Netz NN als Steuerung nach  $a_f = a_f(p_m, n) = NN(p_m, n)$  kann vorstehende Gleichung also als

$$\lambda = \frac{m_{acyl.}}{m_{fcyl.}} = \frac{NL_a(p_m, n)}{NL_f(a_f, n)} = \frac{NL_a(p_m, n)}{NL_f[NN(p_m, n), n]} \quad (13)$$

geschrieben werden. Soll ein bestimmtes Gemischverhältnis  $\lambda_{soll}$  erreicht werden, so muß im Neuronalen Netz NN eine Abbildung gelernt werden, so daß  $m_{acyl.} = \lambda_{soll} m_{fcyl.}$  gilt, also

$$NL_a(p_m, n) = \lambda_{soll} NL_f[NN(p_m, n), n] \quad (14)$$

Vorteilhaft wird hierbei die Ausgangsgröße durch Verknüpfung eines die abgespeicherte Abbildungsinformation repräsentierenden Stützwertevektors und eines von der/den Eingangsgröße/n abhängigen Aktivierungsvektors gebildet (Anspruch 15). Diese Verknüpfung ist vorzugsweise linear, und hat insbesondere die Form eines Skalarprodukts oder – bei mehrdimensionaler Ausgangsgröße – eines Vektor-Matrix-Produkts (Anspruch 16). Gemäß obigem Beispiel erhält man dann die Steuergröße  $a_f$  mit

$$a_f(p_m, n) = \underline{\Theta}^T \underline{A}(p_m, n) \quad (15)$$

wobei  $\underline{\Theta}$  der Stützwertevektor und  $\underline{A}(p_m, n)$  der Aktivierungsvektor ist.

Es ist vorteilhaft, daß der Aktivierungsvektor normiert ist und nur vom Abstand der Eingangsgröße/n zu den Stützstellen abhängt, die der Vektordarstellung zugrunde liegen (Anspruch 17). Die Normierungsbedingung lautet z. B.

$$\underline{A}(x)^T \underline{1} = 1 \quad (16)$$

d. h. die Summe aller Komponenten des Aktivierungsvektors ist stets gleich eins.

Die Abhängigkeit des Aktivierungsvektors  $\underline{A}$  nur vom Abstand der Eingangsgröße/n zu den Stützstellen läßt sich dadurch ausdrücken, daß seine Komponenten  $A_i$  nur von einer Variablen abhängt, die dem Abstand zu der zur betrachteten Stützstelle gehörenden Komponente entspricht:

$$A_i = A_i(d_i) \quad (17)$$

mit den Abständen

$$d_i = \| \underline{x} - \underline{\zeta}_i \| \quad (18)$$

wobei  $\underline{\zeta}_i$  die Stützstellen, d. h. die Orte der Neurone im Eingangsraum sind.

Besonders vorteilhaft ist eine Ausgestaltung, bei der die Abbildung der Eingangsgröße/n auf die Ausgangsgröße/n im wesentlichen lokal ist (Anspruch 18). Dies bedeutet, daß bei einem bestimmten Wert der Eingangsgröße/n im wesentlichen nur derjenige/diejenigen Stützwert/e zu der Abbildung auf die Ausgangsgröße/n beitragen, die in unmittelbarer Nachbarschaft zu der/den Eingangsgröße/n liegt/liegen. Dies wird vorteilhaft dadurch realisiert, daß nur diejenige/n Komponente/n des Aktivierungsvektors nennenswert große Werte erhält/erhalten, die im geringen Abstand zu der/den Eingangsgröße/n liegt/liegen, während Komponenten in größerem Abstand vernachlässigbar klein sind oder verschwinden (Anspruch 19).

Besonders vorteilhaft hängen die Komponenten des Aktivierungsvektors vom Abstand der Eingangsgröße/n zu der

zugehörigen Stützstelle gemäß einer Zentrumsfunktion ab (Anspruch 20). Beispiele für vorteilhafte Zentrumsfunktionen sind

$$A_i \sim e^{-\frac{1}{\sigma} d_i} \text{ oder } A_i \sim \frac{1}{1 + \sigma \cdot d_i^2},$$

wobei  $\sigma$  ein (ggf. variabler) Breitenparameter ist.

Grundsätzlich braucht die "Reichweite" des Lernens nicht mit der derjenigen der Abbildung übereinstimmen. So ist es z. B. möglich, den Lernvorgang lokal zu gestalten (d. h. bei einer Abweichung nur Stützwertkomponenten in der Nähe der Abweichungsstelle zu adaptieren), hingegen die Abbildung nichtlokal durchzuführen (d. h. in die Abbildungsoperation auch Stützwertkomponenten einzubeziehen, die weiter entfernt von dem abzubildenden Eingangswert liegen). Vorteilhaft werden jedoch beide Reichweiten im wesentlichen gleich gewählt, d. h. die Adaption der Abbildungsinformation erfolgt im wesentlichen in dem gleichen Bereich des Abstands von einer Abweichungsstelle, der auch in die Abbildung einer an dieser Stelle liegenden Eingangsgröße auf die Ausgangsgröße einbezogen wird (Anspruch 21).

Vorteilhaft erfolgt die Adaption der Abbildungsinformation im wesentlichen lokal zur Abweichungsstelle (Anspruch 22). Dies läßt sich z. B. durch

$$\Delta \Theta|_{p_{m,n}} \approx \Delta \Theta \quad (19)$$

ausdrücken, wobei  $\Delta \Theta$  ein Stützwertkorrekturvektor ist. Besonders vorteilhaft erfolgt sowohl die Adaption als auch die Abbildung lokal und mit gleicher Reichweite.

Genauer erfolgt die Adaption der Abbildungsinformation vorzugsweise so, daß zu dem Stützwertevektor ein Stützwertkorrekturvektor addiert wird, welcher einer Verknüpfung des Abweichungswerts mit dem Aktivierungsvektor proportional ist (Anspruch 23). Bei der Verknüpfung handelt es sich insbesondere um das Produkt des Abweichungswerts mit dem Aktivierungsvektor. Die Adaption erfolgt z. B. gemäß

$$\Delta \Theta = \eta e(p_{m,n}) \underline{A}(p_{m,n}) \quad (20)$$

Der Faktor  $\eta$  in dieser Gleichung repräsentiert die Lernschrittweite. Die Größe  $e$  ist der gemessene Gemischfehler im Betriebspunkt, der zu

$$e(p_{m,n}) = \lambda(p_{m,n}) - \lambda_{soll} \quad (21)$$

als Abweichung vom hier als konstant angenommenen Sollwert definiert ist. Bei Verwendung einer Breitband-lambda-sonde kann auf die Größe der Abweichung geschlossen werden, während diese Information bei einer Lambda-Sonde mit sprungförmiger Kennlinie nur in Form einer Aussage "zu fett" oder "zu mager" vorliegt. Bildlich gesprochen werden durch die Aktivierung  $\underline{A}(p_{m,n})$  die einzelnen Stützwerte ausgesucht, welche nach der Beziehung

$$\Theta_i^{neu} = \Theta_i^{alt} + \Delta \Theta_i \quad (22)$$

adaptiert werden.

Wird ein lernfähiges Verfahren wie hier Steuerung von Verbrennungsmotoren angewendet, so geschieht der Lernprozeß allein aus Sicherheits- und Akzeptanzgründen vorzugsweise mit einem Adaptionsgesetz mit nachweisbarer Stabilität und Parameterkonvergenz (Anspruch 24). Unter "Konvergenz" wird hier die Konvergenz gegen ein globales Minimum des Abstandes zwischen  $\lambda$  und  $\lambda_{soll}$  in allen zum Lernen angefahrenen Betriebspunkten verstanden (nicht etwa nur Konvergenz gegen ein lokales Minimum). Konvergenz bedeutet dann, daß das Lernverfahren erst dann abgeschlossen sein kann, wenn der Stützwertevektor gegen den einzig möglichen, aber unbekannten Stützwertevektor konvergiert. Es wird Bezug genommen auf die folgende Beschreibung eines Beweises für Stabilität und Konvergenz eines bevorzugten Adaptionsgesetzes.

Vorrichtungsmäßig wird die eingangs genannte Aufgabe durch eine Vorrichtung zur Gemischsteuerung bei einem Verbrennungsmotor gemäß Anspruch 24 gelöst, die folgendes umfaßt:

- a) wenigstens eine Einrichtung zur Messung wenigstens einer Größe, mit der die in einen Brennraum des Verbrennungsmotors gelangende Luftmasse im Zusammenhang steht (sog. Eingangsgröße);
- b) wenigstens eine Stalleinrichtung zum Zuführen von Kraftstoff;
- c) wenigstens eine Einrichtung zur Messung einer Größe, die Information über das so entstandene Gemisch oder dessen Verbrennung trägt (sog. Istgröße);
- d) wenigstens einen Speicher zur Aufnahme der veränderlichen Abbildungsinformation;
- e) und einen zur Ausführung des Verfahrens nach Anspruch 1 programmierten und/oder fest verdrahteten Rechner.

Bezüglich vorteilhafter Ausgestaltungen der Vorrichtung wird auf die obigen Ausführungen zum Verfahren verwiesen. Die Erfindung wird nun anhand von Ausführungsbeispielen und der angefügten Zeichnung veranschaulicht. In der Zeichnung zeigen:

Fig. 1 einen Signalfußplan für die Bildung des Gemischverhältnisses bei einem direkteinspritzenden Kolben-Verbrennungsmotor mit herkömmlicher Einlaßsteuerung;

Fig. 2 einen Signalfußplan entsprechend Fig. 1, jedoch für einen ungedrosselten Verbrennungsmotor mit frei betätigten Einlaßventilen;

- Fig. 3 eine Schemadarstellung eines direkt einspritzenden Otto-Motors mit herkömmlicher Einlaßventilsteuerung;  
 Fig. 4 einen Signallaßplan entsprechend Fig. 1, jedoch mit Darstellung eines Neuronales-Netz-Algorithmus;  
 Fig. 5 eine sog. Parallel-Darstellung eines Neuronales-Netz-Algorithmus;  
 Fig. 6 eine Signallaßplandarstellung eines Neuronales-Netz-Algorithmus mit einer Eingangsdimension;  
 Fig. 7 Diagramme, welche die Netzausgabe als Funktion eines eindimensionalen Eingangswerts darstellen, zur Veranschaulichung der Lokalität der Stützwertadaptation;  
 Fig. 8 eine Veranschaulichung des Inter- und Extrapolationsverhalten eines Neuronales-Netz-Algorithmus;  
 Fig. 9 eine einfache Lernstruktur eines Neuronales-Netz-Algorithmus;  
 Fig. 10 eine Darstellung einer beispielhaft angenommenen Nichtlinearität für den Luftpfad;  
 Fig. 11 ein Fig. 10 entsprechende Darstellung für den Kraftstoffpfad;  
 Fig. 12 ein Diagramm des zeitlichen Verlaufs der Ausgangsgröße zum Beginn des Lernens;  
 Fig. 13 ein Diagramm gemäß Fig. 12, jedoch im Verlauf des Lernens;  
 Fig. 14 ein Diagramm gemäß Fig. 12, jedoch nach nahezu abgeschlossenem Lernprozeß;  
 Fig. 15 ein Diagramm des Gemischfehlers im Verlauf des Lernprozesses; und  
 Fig. 16 eine Gegenüberstellung des zu erlernenden und des erlernten Zusammenhangs.

Wichtig bei der Anwendung von Ansätzen mit Lernprozeß ist der Sicherheitsgedanke, die Frage also, ob das Lernen stets ohne Irrwege zum richtigen Ergebnis führt; ein mathematischer Stabilitäts- und Konvergenzbeweis sollte also führbar sein. Bei dem im folgenden zu beschreibenden beispielhaften Vorgehen wird ein spezielles Neuronales Netz in Abhängigkeit bestimmter meßbarer Zustandsgrößen des Verbrennungsmotors und/oder des Fahrerwunsches das Tastverhältnis der Einspritzung durch direkteinspritzende (Magnet-)Ventile als Steuergröße ausgegeben. Sinnvollerweise wird das Neuronale Netz neben stationär bestimmtem Vorwissen als Korrekturglied angesetzt, welches online so adoptiert wird, daß stets das gewünschte Gemischverhältnis adaptiert wird.

Bezüglich der Bildung von Gemischverhältnissen wird auf die Fig. 1 und 2 und die dazugehörigen vorausgegangenen Ausführungen verwiesen.

Die nachfolgende Darstellung von Ausführungsbeispielen soll zunächst an einem direkteinspritzenden Ottomotor mit herkömmlicher Einlaßventilsteuerung mit festen Steuerzeiten nach Fig. 3 erfolgen.

Die Laststeuerung bei dieser Verbrennungsmotoren-Bauart geschieht über den Lagewinkel der Drosselklappe: der Fahrer steuert damit den Luftmassenstrom  $\dot{m}_{at}$  in das Saugrohr. Bei geöffneten Einlaßventilen saugt der Zylinder während der Abwärtsbewegung des Kolbens im Ansaugtakt den Luftmassenstrom  $\dot{m}_{av}$  an, bis nach dem Schließen die Frischluftmasse  $m_{acyl}$  im Zylinder zur Verbrennung zur Verfügung steht. Die Frischluftmasse im Zylinder hängt dabei entscheidend von dem thermodynamischen Saugrohrzustand Druck  $p_m$  nach Gleichung 2 ab. Letztendlich bestimmt der Fahrer also über die Drosselklappenlage den Luftdruck im Saugrohr und damit mittelbar die Last im Zylinder.

Aus den obigen Ausführungen geht hervor, daß die nach dem Schließen der Einlaßventile im Brennraum befindliche Luftmasse  $m_{acyl}$  nichtlinear abhängig von einerseits der Motordrehzahl und andererseits dem Saugrohrdruck ist.

Die Motordrehzahl bestimmt nämlich die zum Ansaugen zur Verfügung stehende Zeitspanne, so daß als Faustregel gilt, daß bei niedrigerer Drehzahl mehr Frischluft gleichen thermodynamischen Zustandes wie im Saugrohr angesaugt werden kann.

Durch das konstruktive Design der Ansaugkrümmer und des Saugrohres wird dazu der Effekt erzielt, daß durch akustische Phänomene (Interferenzen) in bestimmten Drehzahlbereichen eine höhere Füllung erreicht wird. Dies wird bei Verbrennungsmotoren mit variabler Saugrohrgeometrie zur Drehmomentensteigerung ausgenutzt.

Bei schnellem Herablaufen des Kolbens bei geöffneten Einlaßventilen besteht im Inneren der Zylinder gegenüber dem Saugrohr ein großer Unterdruck, so daß der Zylinder aus dem Saugrohr ansaugt. Nach der thermodynamischen Durchflußgleichung für kompressible Medien jedoch kann das durchströmende Medium keine höhere als die Schallgeschwindigkeit erreichen, so daß der Massenstrom durch das Einlaßventil für verschiedene Betriebsbereiche des Motors bei wachsendem Druckunterschied nicht mehr weiter ansteigen kann (Lavalverhältnis, choked-flow-Effekt).

Insgesamt hängt also die angesaugte Luftmasse  $m_{acyl}$  bei diesem Beispiel stetig nichtlinear ab vom Saugrohrdruck und der Drehzahl, bei variabler Ansauggeometrie zudem noch von deren Steuerwinkel oder dem der verstellbaren Einlaßnockenwelle.

Mathematisch schreiben wir also

$$m_{acyl} = NL_a(p_m, n) \quad (23)$$

Analoge Überlegungen lassen sich für die Kraftstoff-Direkteinspritzung anstellen: Infolge der Massenträgheit der Ventiltadeln ergibt sich auch hier ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen eingespritzter Kraftstoffmasse und Tastverhältnis zusammen mit der Tastfrequenz (reziprok der halben Drehzahl bei Viertakt-Motoren). Ein weiterer Effekt, der die eingespritzte Kraftstoffmasse nichtlinear beeinflusst, ist der Abfall des Kraftstoffversorgungsdruckes beim Öffnen des Ventils: auch hierdurch entstehen im Kraftstoffversorgungssystem Druckschwingungen, welche das Einspritzverhalten drehzahlabhängig beeinflussen. Insgesamt hängt die eingespritzte Kraftstoffmasse nach diesen Überlegungen statisch nichtlinear ab von der Ventilöffnungszeit und der Einspritzfrequenz ( $2/n$ ).

Mathematisch schreiben wir also

$$m_{fcyl} = NL_f(a_f, n) \quad (24)$$

Die Idee zur Gemischsteuerung besteht jetzt darin, ein Neuronales Netz NN so anzusetzen, daß die Steuergröße des Luftpfades (hier der Saugrohrdruck) auf die Steuergröße des Kraftstoffpfades solchermaßen abgebildet wird, um so ein gewünschtes Gemischverhältnis zu erreichen.

Das lernfähige Neuronale Netz NN soll dabei in Abhängigkeit des Motorbetriebszustandes (hier die Drehzahl) und der fahrerbeeinflussten Steuergröße für den Luftpfad (hier der Saugrohrdruck) die Steuergröße (hier  $a_f$ ) für den Kraftstoffpfad

ausgeben.

Der Ausgang des Neuronalen Netzes entspricht also hier dem Tastverhältnis der Einspritzventile  $a_f$ , der Eingangsraum des Neuronalen Netzes NN besteht aus Saugrohrdruck  $p_m$  und Motordrehzahl  $n$ , wir schreiben also

$$a_f = NN(p_m, n) \quad (25)$$

Das Ziel der Steuerung ist, für jeden Betriebspunkt ein gewünschtes Kraftstoff-Luft-Verhältnis mit

$$\lambda = \frac{m_{acyl}}{K_\lambda m_{fcyl}} \quad (26)$$

zu erreichen. Im weiteren vernachlässigen wir den konstanten Faktor  $K_\lambda$ . Mit dem NN als Steuerung nach  $a_f = a_f(p_m, n) = NN(p_m, n)$  kann vorstehende Gleichung also als

$$\lambda = \frac{m_{acyl}}{m_{fcyl}} = \frac{NL_a(p_m, n)}{NL_f(a_f, n)} = \frac{NL_a(p_m, n)}{NL_f[NN(p_m, n), n]} \quad (27)$$

geschrieben werden. Soll ein bestimmtes Gemischverhältnis  $\lambda_{soll}$  erreicht werden, so muß im NN eine Abbildung gelernt werden, so daß  $m_{acyl} = \lambda_{soll} m_{fcyl}$  gilt, also

$$NL_a(p_m, n) = \lambda_{soll} NL_f[NN(p_m, n), n] \quad (28)$$

Beispielhaft für eine Vielzahl lernfähiger Neuronaler Netzarchitekturen verwenden wir ab hier das sogenannte DANN, welches den gewählten Ansatz besonders plausibel macht; außerdem gestattet dieser Algorithmus eine einfache Beweisführung für Stabilität und Parameterkonvergenz ebenso wie eine sinnvolle Interpretierbarkeit des gelernten Wissens. Das DANN ist eine besonders rechenzeitoptimale Ausgestaltung eines sogenannten RBF-Netzes mit lokaler Stützwertewirkung. Eine eingehende Beschreibung des DANN folgt unten.

Wir setzen also an

$$a_f(p_m, n) = \underline{\Theta}^T \underline{A}(p_m, n) \quad (29)$$

wobei die Stützwerte  $\underline{\Theta}$  des Neuronalen Netzes so adaptiert werden müssen, um beide Nichtlinearitäten in Gleichung 28 im Betriebspunkt  $(p_m, n)$  auszugleichen.

Dies soll mit dem Adaptionansatz

$$\Delta \underline{\Theta} = \eta c(p_m, n) \underline{A}(p_m, n) \quad (30)$$

mit garantierter Stabilität erfolgen. Der Faktor  $\eta$  in dieser Gleichung repräsentiert die Lernschrittweite. Bildlich gesprochen werden durch die Aktivierung  $\underline{A}(p_m, n)$  die einzelnen Stützwerte ausgesucht, welche nach der Beziehung

$$\underline{\Theta}_i^{neu} = \underline{\Theta}_i^{alt} + \Delta \underline{\Theta}_i \quad (31)$$

adaptiert werden. Nun wirken die Stützwerte beim DANN hauptsächlich lokal, ohne großen Fehler können wir

$$\Delta \underline{\Theta} = \eta e(p_m, n) \underline{A}(p_m, n) \hat{=} \Delta \underline{\Theta}|_{p_m, n} = \eta e \quad (32)$$

annehmen (wobei die Größe rechts neben dem Entsprechenzeichen die Komponente des  $\underline{\Theta}$ -Vektors ist, die der Stelle  $(p_m, n)$  nächsten liegt).

Wegen des taktdiskreten Arbeitsverfahren des Kolben-Verbrennungsmotors ersetzen wir in dieser Ableitung die kontinuierliche Ableitung (nach der Zeit) durch die Notation mit Deltagrößen, was einer Ableitung nach den Arbeitstakten des Verbrennungsmotors entsprechen soll.

Um den Stabilitätsbeweis mathematisch zu führen, untersuchen wir die Auswirkung dieser lokalen Adaption nach Gleichung 32 auf den Gemischfehler  $e$  im Betriebspunkt, der zu

$$e(p_m, n) = \lambda(p_m, n) - \lambda_{soll} \quad (33)$$

als Abweichung vom hier als konstant angenommenen Sollwert definiert ist. Wir bestimmen also

$$\frac{\Delta e(p_m, n)}{\Delta \underline{\Theta}|_{p_m, n}} = \frac{\Delta \lambda(p_m, n)}{\Delta \underline{\Theta}|_{p_m, n}} \quad (34)$$

woraus mit Gleichung 27

$$\frac{\Delta e(p_m, n)}{\Delta \Theta|_{p_m, n}} = \frac{\Delta \lambda(p_m, n)}{\Delta a_f(p_m, n)} \frac{\Delta a_f(p_m, n)}{\Delta \Theta|_{p_m, n}} \quad (35)$$

folgt. Zunächst wollen wir den ersten Quotienten der rechten Seite aus vorstehender Gleichung betrachten:

$$\frac{\Delta \lambda}{\Delta a_f}$$

ist kleiner oder gleich null! Dies kann ganz einfach erklärt werden: bei konstanter Luftmasse im Zylinder nimmt die Luftzahl  $\lambda$  mit zunehmender eingespritzter Kraftstoffmasse  $m_{fcyl}$  ab, das Gemisch wird fetter. Und mit zunehmendem Tastverhältnis  $a_f$ , also längerer Ventilöffnungsdauer bei gleichbleibender Drehzahl, wird natürlich auch mehr Kraftstoff eingespritzt, zumindest aber gleichviel; weniger wäre widersinnig. Es gilt also nach Gleichung 27

$$\frac{\Delta \lambda(p_m, n)}{\Delta a_f(p_m, n)} = -NL_a(p_m, n) \frac{\frac{\Delta}{\Delta a_f(p_m, n)} NL_f(a_f, n)}{NL_f^2(a_f, n)} = -K_1 \frac{1}{NL_f^2(a_f, n)} \leq 0 \quad (36)$$

weil ja

$$K_1 = NL_a(p_m, n) \frac{\Delta}{\Delta a_f(p_m, n)} NL_f(a_f, n) \geq 0 \quad (37)$$

natürlich größer (oder evtl. gleich) null ist.

Nun betrachten wir den zweiten Quotienten der rechten Seite von Gleichung 35: Aus den Eigenschaften des Neuronalen Netzes DANN folgt

$$\frac{\Delta a_f(p_m, n)}{\Delta \Theta|_{p_m, n}} > 0 \quad (38)$$

was bedeutet, daß bei Verstellung eines Stützwertes nach oben an einer bestimmten Stelle im Eingangsraum des DANN/GRNN die Ausgabe des Netzes an dieser Stelle natürlich auch steigt. Damit gilt

$$\frac{\Delta \lambda(p_m, n)}{\Delta \Theta|_{p_m, n}} = -k \leq 0 \quad (39)$$

Diese Ableitungen sind möglich, weil bei der Stützwerteadaptation wegen der Lokalität der Stützwertewirkung dieser Netze

$$\Delta \Theta|_{p_m, n} \approx \Delta \Theta = e(p_m, n) \underline{A}(p_m, n) \quad (40)$$


gilt.

Wir können nun zusammenfassen:

$$\Delta e(p_m, n) = \Delta \lambda(p_m, n) = \frac{\Delta \lambda(p_m, n)}{\Delta \Theta|_{p_m, n}} \Delta \Theta|_{p_m, n} \quad (41)$$

und mit dem Adaptionsgesetz folgt

$$\Delta e(p_m, n) = \Delta \lambda(p_m, n) = \frac{\Delta \lambda(p_m, n)}{\Delta \Theta|_{p_m, n}} \Delta \Theta|_{p_m, n} = -k \eta e(p_m, n) \quad k \geq 0 \quad (42)$$


  
 $-k, k > 0$

Damit ist die Beziehung

$$\Delta e(p_m, n) = -k \eta e(p_m, n) \quad k \geq 0 \quad (43)$$



hergeleitet, mit der die Stabilität des Adaptionansatzes 18 bewiesen ist. Dazu interpretieren wir Gleichung 43 verbal:

Das Vorzeichen der Fehleränderung ist also stets invers dem Vorzeichen des Fehlers; mit anderen Worten, ist der Fehler kleiner null ( $e < 0$ ), so steigt sein Wert ( $\Delta e > 0$ ), sein Betrag wird damit kleiner. Ist der Fehler größer null, so fällt sein Wert, auch hier wird somit der Betrag kleiner. Somit kann der Fehler nur gegen null konvergieren.

Neben der Konvergenz des Gemischfehlers im Arbeitspunkt zu null folgt aus den Eigenschaften des DANN die Konvergenz der Stützwerte in den gelernten Arbeitspunkten gegen die einzig möglichen Stützwerte, mit denen  $\lambda = \lambda_{\text{soll}}$  erreicht werden kann. Diese Ableitung gilt lokal, für den Arbeitspunkt  $(p_m, n)$  des Verbrennungsmotors. Logisch ist, wiederum wegen der Lokalität der Stützwertwirkung, daß nur in diesen Betriebspunkten der Gemischfehler mit hoher Genauigkeit ausgeglichen wird, in denen auch die Steuerung lernen kann.

Zu berücksichtigen ist noch eine Lernkorrelation, nämlich eine Totzeit wegen des Viertakt-Arbeitsverfahrens. Bei den obenstehenden Ableitungen waren wir bei der Adaption davon ausgegangen, daß bei der Gemischbildung gleich der entstehende Gemischfehler zur Adaption der Einspritzsteuerung herangezogen werden kann. Infolge des Viertakt-Arbeitsverfahrens des Verbrennungsmotors steht jedoch bei Verwendung einer Abgas-Lambdasonde erst frühestens nach drei Takten Totzeit (Verdichten, Verbrennen, Ausschleiben) ein Meßwert für die Luftzahl zur Verfügung. Dargestellt ist dies in Fig. 4. Diese Figur zeigt einen Signallaufplan für die Bildung des Gemischverhältnisses bei gedrosselten direkteinspritzenden Kolben-Verbrennungsmotoren. Die zusätzliche (dünn eingezeichnete) Abhängigkeit  $\eta_{\text{vol}} = f(\dots, \alpha_{\text{cs, sr}})$  gilt für Motoren mit variabler Nockenwelle oder Schaltsaugrohr. Zwischen Gemischbildung und Lambda-Messung liegt eine Totzeit von drei Takten wegen des Viertakt-Arbeitsverfahrens des Verbrennungsmotors.

Zur Lernkorrelation müssen wir demnach bei der Adaption diese Totzeit berücksichtigen. Dies geschieht zweckmäßigerweise durch eine einfache Verzögerung der Eingangswerte ( $p_m$  und  $n$ ) bei der Adaption, so daß Fehlersignal und zu verstellender Stützwert miteinander korrelieren. Dagegen müssen zur Bildung des Einspritzsignals ( $a_f$ ) die unverzögerten Eingangswerte herangezogen werden.

Das obenstehend beschriebene Beispiel betrifft die Synthese eines Steuergesetzes für die Einspritzung bei direkteinspritzenden Verbrennungsmotoren. Der Beschreibung lag ein gedrosselter Benzin-Direkteinspritzer mit konstantem Soll-Gemischverhältnis zugrunde. Kann das Soll-Gemischverhältnis wie beispielsweise bei Dieselmotoren einen variablen Wert annehmen, so kann dieser Sollwert als zusätzliche Eingangsdimension des DANN vorgesehen werden. Ebenso kann bei nockenwellenlos angetriebenen Einlaßventilen deren Steuersignal (Tastverhältnis  $a_a$ ) anstelle des Saugrohrdruckes als Netzeingang herangezogen werden. Sinnvoll ist bei einer realen Implementierung der Ansatz des Neuronalen Netzes als Korrekturglied neben z. B. off-line bestimmten Vorwissen in Form etwa einer linearen Abbildung  $p_m \rightarrow a_f$ . Dadurch kann die Lernzeit erheblich verringert werden.

Die folgende Tabelle gibt überblickartig die hier verwendete Nomenklatur wieder:

	$m_{\text{aoyl}}$	Masse Frischluft im Zylinder	kg
35	$\dot{m}_{\text{at}}$	Massenstrom Frischluft durch Drosselstelle	kg s <sup>-1</sup>
	$\dot{m}_{\text{av}}$	Massenstrom Frischluft in den Zylinder	kg s <sup>-1</sup>
	$m_{\text{foyl}}$	Masse Kraftstoff im Zylinder	kg
40	$n$	Drehzahl des Kolben-Verbrennungsmotors	s <sup>-1</sup>
	$p_0$	Umgebungsdruck der Luft (langsam veränderlich)	Pa
	$p_m$	Luftdruck im Saugrohr	Pa
	$R$	Gaskonstante	J/kgm
	$T_0$	Lufttemperatur in der Umgebung (langsam veränderlich)	K
45	$T_\lambda$	Zeitkonstante der Lambdasonde	s
	$T_m$	Lufttemperatur im Saugrohr	K
	$V_D$	Hubvolumen eines Zylinders	m <sup>3</sup>
	$\alpha_{\text{cs}}$	Steuerwinkel bei variabler Nockenwellensteuerung (VANOS)	rad
50	$\alpha_{\text{th}}$	Lagewinkel der Drosselklappe	rad
	$\eta_{\text{vol}}$	Volumetrische Effizienz	—
	$\lambda$	Luftzahl	—
	$\lambda_m$	gemessene Luftzahl	—

Im folgenden wird als Beispiel für einen geeigneten lernfähigen Neuronalen-Netz-Algorithmus das sogenannte DANN näher erläutert. Es verbindet die Vorteile normierter RBF-Netze mit dem Vorteil der Rechenzeit- und Speicherplatzoptimierung.

Bei Verwendung des sogenannten Distance Activation Neural Network DANN nach Fig. 5 die eine Parallel-Darstellung eines DANN mit zwei Eingangsdimensionen zeigt, wird durch die lokale Stützwertwirkung beim Lernvorgang Parameterkonvergenz garantiert und die Problematik der sog. persistent excitation umgangen. Parameterkonvergenz bedeutet hierbei, daß das Neuronale Netz nur mit einem Parametersatz eine bestimmte statische Nichtlinearität approximieren kann. Es besteht demnach eine eindeutige Zuordnung von gelerntem Zusammenhang und Stützwerten des NN, dies macht das gelernte Wissen interpretierbar. Dieser im Vergleich zu anderen lernfähigen Algorithmen entscheidende Vorteil beruht auf der Form des RBF-Netzes, speziell des DANN: die beim Lernen zu verstellenden Parameter wirken in der Hauptsache lokal und das Netz liefert damit eine stetige Ausgangsfunktion über dem Eingangsraum mit definiertem Interpolationsverhalten. Das Extrapolationsverhalten des DANN an Stellen, an denen ein Wissen in Form gelernter Parameter zur Verfügung steht, ist ebenso definiert wie sinnvoll: der Ausgang des Netzes entspricht einem (gewichteten) Mit-



telwert des gelernten Wissens in der gelernten Umgebung; das DANN unterscheidet sich hierin erheblich vom originären RBF-Netz. Das Netz besteht aus lokal aktivierten Neuronen, d. h. hauptsächlich die Neuronen in der unmittelbaren Umgebung des Netzeinganges  $\underline{x}$  werden aktiviert. Die Struktur des DANN ist unterteilbar in Aktivierung und Gewichtung. Dies veranschaulicht die in Fig. 6 gezeigte Signalfußplan-Darstellung eines DANN mit einer Eingangsdimension (d. h. skalarem Eingang  $x$ ).  $\underline{A}(\underline{x})$  und  $\underline{\vartheta}$  sind Vektoren;  $\hat{y}(\underline{x}) = \underline{\vartheta}^T \underline{A}(\underline{x})$ . Dadurch ist es beim Lernen für das sogenannte Verfahren der verzögerten Aktivierung zugänglich.

Kurz sei nun der Algorithmus des DANN beschrieben: Ein skalarer Schätzwert  $\hat{y}$  an einer Stelle  $\underline{x} \in \mathbb{R}^n$  mit einer gegebenen Menge von  $q$  Datenpunkten (Stützwerten  $\vartheta_i$  an Stützstellen  $\underline{\zeta}_i$ ) ( $\vartheta_i, \underline{\zeta}_i$ ,  $i \in [1, q]$ ) und  $\underline{\zeta} \in \mathbb{R}^n$  ist beim DANN definiert durch die Gleichung

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^q \vartheta_i \frac{1}{1 + \sigma d_i^2}}{\sum_{i=1}^q \frac{1}{1 + \sigma d_i^2}} = \underline{\hat{g}}^T \underline{A}(\underline{x}) \quad (44)$$

mit den Abständen

$$d_i = \|\underline{x} - \underline{\zeta}_i\| \quad (45)$$

Gleichung 44 garantiert die Beschränktheit der Aktivierung  $\underline{A}(\underline{x})$ , durch die Normierung wird

$$\underline{A}(\underline{x})^T \underline{1} = 1 \quad (46)$$

erreicht, das heißt, die Summe der Aktivierungen aller Neuronen ist stets gleich eins; ebenso beträgt die Aktivierung eines einzelnen Neurons stets einen Wert zwischen null und eins. Aus Gleichung 44 wird klar, daß bei sehr kleinem Glättungsfaktor  $\sigma$  nahezu nur ein einziges Neuron aktiviert wird; damit trägt also beinahe nur ein einziger Stützwert zum Ergebnis der Auswertung bei. Wird also ein Stützwert verstellt, so wird der Netzausgang auch nur in dessen Umgebung verändert. Wir nennen diesen Sachverhalt "Lokalität" der Stützwertwirkung. Zur Veranschaulichung zeigt Fig. 7 die Lokalität der Stützwertwirkung, der Netzausgang ändert sich nur in der Umgebung des verstellten Stützwertes. Diese Feststellung ist wichtig für den Stabilitätsbeweis des Lernens bei dem erfindungsgemäßen Verfahren.

Gleichung 44 definiert eine stetige beliebig nichtlineare Ausgangsfunktion  $\hat{y} = f(\underline{x})$  (bezeichnet geschätzte oder verstellbare Größen) mit definiertem Inter- und Extrapolationsverhalten wie in Fig. 8 dargestellt. Diese Figur zeigt Inter- und Extrapolationsverhalten des DANN, die Kreuze bezeichnen die vorhandenen Datenpunkte. Im gelernten Bereich stimmt der durch die Stützwerte (Kreuze) approximierten Verlauf mit der zu erlernenden Sinus-Funktion überein. Über den gelernten Bereich hinaus tendiert der Schätzwert mit zunehmender Entfernung vom nächsten Stützwert zum Durchschnitt aller vorhandenen Wissens (Stützwerte). Der Schätzwert an einer Auswertestelle mit großem Abstand zum gespeicherten Wissen (Datenpunkte) wird sich zum Mittelwert des vorhandenen Wissens ergeben, in der unmittelbaren Nähe eines Datenpunktes bestimmt dieser hauptsächlich den Netzausgang. Werden die Stützwerte in ihrem Gewicht  $\vartheta_i$  als verstellbar definiert, so kann die einfachste, in Fig. 9 dargestellte Online-Struktur zum Lernen abgeleitet werden. Diese Darstellung gilt für zeitkontinuierliche Systeme. Das gezeigte DANN kann alle statischen (ohne interne Zustände wie z. B. Gedächtnis) Nichtlinearitäten bis hin zu Unstetigkeiten (grouped activation method) abgesehen eines kleinen Approximationsfehlers wegen der endlichen Stützwertanzahl erlernen. Bei Abbildungen mit Gedächtnis (z. B. wegen des oben erwähnten Speichereffekts) wird die Information über vorausgegangene Ereignisse in das Lern- und Abbildungsverhalten mit einbezogen. Die in Fig. 9 dargestellte Lernstruktur basiert auf einem bekannten mathematischen Fehlermodell, für das Stabilität nach der direkten Methode nach Ijapunov bewiesen ist.

Eine zu erlernende eindimensionale Nichtlinearität wie in Fig. 9 soll in der DANN-Form als das Skalarprodukt  $y(t) = \underline{\vartheta}^T \underline{A}(\underline{x}(t)) + d$  dargestellt sein, wobei  $\underline{x}(t), y(t) \in \mathbb{R}$  und  $\underline{A}, \underline{\vartheta} \in \mathbb{R}^n$ ; der konstante Vektor  $\underline{\vartheta}$  ist der unbekannte zu erlernende Parametervektor der Dimension  $n$ , wobei  $n$  Stützwerte verteilt über dem Eingangsraum die reale zu erlernende Nichtlinearität bis auf den Fehler  $d \rightarrow 0$  mit  $n \rightarrow \infty$  darstellen können. Nach Fig. 9 berechnet sich der Beobachterfehler zu  $e(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ . Wird ein Parameterfehlervektor definiert als  $\underline{\Phi}(t) = \underline{\hat{\vartheta}}(t) - \underline{\vartheta}$ , so ergibt sich die Fehlergleichung zu

$$e(t) = \underline{A}(\underline{x}(t))^T \underline{\Phi}(t) \quad (47)$$

Nach dem Fehlermodell 1 kann

$$\dot{\underline{\Phi}}(t) = -e(t) \underline{A}(\underline{x}(t)), \quad (48)$$

als garantiert stabiles Adaptionsgesetz gewählt werden, da wegen der Eigenschaften des DANN (Gleichung 44) der Vektor  $\underline{A}(\underline{x}(t))$  in allen seinen Komponenten beschränkt ist.

Dies führt zu einer monoton abnehmenden Funktion  $\|\underline{\Phi}(t)\|$ , was ja  $\lim_{t \rightarrow \infty} \underline{\hat{\vartheta}}(t) = \underline{\vartheta}$  bedeutet.

Bei den vorliegenden Ausführungsbeispielen wird die gezeigte Lernfähigkeit des DANN zur Synthese eines Steuerungsgesetzes für die Kraftstoffeinspritzung verwendet, indem beim Lernen der Fehler zwischen Soll-Gemischverhältnis und Ist-Gemischverhältnis zu null gemacht wird.

Obiges Ausführungsbeispiel soll nun an einer Simulation demonstriert werden: Es soll die Fähigkeit des Ansatzes gezeigt werden, daß eine Abbildung gelernt werden kann, so daß gilt

$$NL_a(p_m, n) = \lambda_{soll} NL_f[NN(p_m, n), n] \quad (49)$$

Zur Demonstration sei  $\lambda_{soll}$  gleich 1. Zum Zweck der Veranschaulichung wird für  $NL_a(p_m, n)$  die statische stetige nichtlineare Beziehung

$$NL_a(p_m, n) = [1 - \exp(-4p_m)] \exp(-n) \quad (50)$$

angenommen, für  $NL_f(a_f, n)$  nehmen wir

$$NL_f(a_f, n) = \left[ 1 - \frac{2}{2 + a_f} \right] \exp(-0.5n) \quad (51)$$

an, eine nichtlineare Funktion, die mit  $a_f$  monoton steigend ist. Diese beiden für den Luftpfad und den Kraftstoffpfad angenommenen Nichtlinearitäten sind in den Fig. 10 und 11 dargestellt.

Sind diese Abhängigkeiten bekannt, so kann analytisch die Abbildung  $NN_{soll}$  berechnet werden, so daß Gleichung 49 mit  $NN = NN_{soll}$  erfüllt wird. Mit den Beziehungen nach Gleichungen 50 und 51 ergibt sich für die Abbildung  $NN_{soll}$

$$a_f(p_m, n) = NN_{soll} = \frac{2}{1 - (1 - \exp(-4p_m)) \exp(-0.5n)} - 2 \quad (52)$$

die durch die Reglersynthese zu erlernen ist.

Drehzahl  $n$  sei auf Maximaldrehzahl normiert, ebenso der Saugrohrdruck auf Umgebungsdruck, diese Größen schwanken also beide zwischen 0 und 1. Zur Lernsimulation wird nun der Eingangsraum  $n \in [0.2, 0.8]$  und  $p_m \in [0.2, 0.8]$  flächendeckend durchfahren, in Fig. 16 wird dies bei der gelernten Steuerfläche deutlich. In den Fig. 12, 13 und 14 ist dabei der zu erlernende Steuerverlauf nach Gleichung 52 und der online vom Netz erlernte Verlauf von  $a_f$  während des Lernvorganges dargestellt. Diese Figuren zeigen jeweils den optimalen Verlauf der Steuergröße (gestrichelt) und den vom Netz gelernten Verlauf (durchgezogen). Fig. 12 zeigt dabei den Beginn des Lernens (wobei ohne jedes Vorwissen begonnen wurde), Fig. 13 den Steuergrößenverlauf während des Lernens, und in Fig. 14 ist das Lernen so gut wie abgeschlossen. Den während des Lernens schnell kleiner werdenden Gemischfehler zeigt Fig. 15.

Den dabei im Neuronalen Netz gelernten Zusammenhang stellt Fig. 16 der zu lernenden Abhängigkeit gegenüber. Die Figur zeigt den zu erlernenden und den gelernten Zusammenhang, und zwar jeweils die Steuerfläche. Im Zielzusammenhang ist nur die Fläche über dem während des Lernens zu durchfahrenden Eingangsraum dargestellt, um einen einfachen Vergleich zu ermöglichen. Selbstverständlich war auch nur im durchfahrenen Eingangsraum gelernt worden, demzufolge ist auch nur dort das Wissen aussagekräftig.

Diese Simulation demonstriert, daß ohne jedes Vorwissen bereits nach größenordnungsmäßig 10000 Takten (verteilt über die verschiedenen Betriebspunkte), ein ganzes Kennfeld für die Einspritzsteuerung mit sehr großer Genauigkeit "angelernt" ist.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Gemischsteuerung bei einem Verbrennungsmotor, das folgende Schritte umfaßt:

- Messen wenigstens einer Größe, mit der die in einen Brennraum des Verbrennungsmotors gelangende Luftmasse im Zusammenhang steht (sog. Eingangsgröße);
- Ermitteln wenigstens einer die zuzuführende Kraftstoffmenge steuernde Ausgangsgröße in Abhängigkeit von wenigstens der/den in a) gemessenen Eingangsgröße/n, mit Hilfe gespeicherter Abbildungsinformation;
- Zuführen der Kraftstoffmenge entsprechend der Ausgangsgröße aus b);
- Messen einer Größe, die Information über das so entstandene Gemisch trägt (sog. Istgröße);
- Ermitteln einer Abweichung der in d) gemessenen Istgröße von einem Sollwert für diese Größe;
- Verändern der gespeicherten Abbildungsinformation in Abhängigkeit von der in e) ermittelten Abweichung für den in a) gemessenen Betriebszustand, so daß bei einem zukünftigen Durchlaufen der Schritte a) bis c) im gleichen Betriebszustand die Abweichung kleiner wird; und das damit einen Lernprozeß realisiert.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Schritte a) bis e) taktweise durchgeführt werden, wobei die Schritte d) und e) dem Takt zugeordnet werden, in dem die Schritte a) bis c) durchgeführt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem der Verbrennungsmotor ein Motor mit oder ohne Aufladung ist und die Eingangsgröße bzw. eine der Eingangsgrößen der Druck im Saugrohr des Verbrennungsmotors ist.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem der Verbrennungsmotor mit einem veränderlichen Ansaugsystem ausgerüstet ist, und eine dessen Stellung charakterisierende Größe die Eingangsgröße bzw. eine der Eingangsgrößen ist.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem der Verbrennungsmotor eine Einlaßventilsteuerung mit verstellbaren Ventilsteuerzeiten aufweist und die Eingangsgröße bzw. eine der Eingangsgrößen ein oder mehrere Ventilsteuerzeitparameter sind.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem der Verbrennungsmotor frei betätigbare Einlaßventile aufweist und die Eingangsgröße bzw. eine der Eingangsgrößen das Tastverhältnis und/oder die Schließ- und/oder Öff-

nungszeit der Einlaßventile sind.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem die Eingangsgröße bzw. eine der Eingangsgrößen die Drehzahl des Verbrennungsmotors ist.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, bei dem der Verbrennungsmotor mit variablem Gemischverhältnis gesteuert wird, und deshalb das Soll-Gemischverhältnis eine der Eingangsgrößen ist.

9. Verfahren nach Anspruch 1 bis 8, bei dem die Ausgangsgröße eine oder mehrere der folgenden Größen ist: Einspritzdauer, Tastverhältnis der Einspritzventilöffnung, Einspritzdruck, Öffnungsgrad des Einspritzventils.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, bei dem als Verbrennungsmotor ein Motor verwendet wird, der im wesentlichen keinen Kraftstoffspeichereffekt aufweist, insbesondere ein direkteinspritzender Motor.

11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem die Ermittlung der Ausgangsgröße/n im Schritt b) nur auf Größen beruht, die zum aktuell vorliegenden Arbeitstakt gehören.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, bei dem ein Verbrennungsmotor mit Kraftstoffspeichereffekt verwendet wird, und in die Ermittlung der Ausgangsgröße/n im Schritt b) auch Größen aus einem oder mehreren vorhergehenden Arbeitstakten einbezogen werden.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, bei dem die gespeicherte Abbildungsinformation die Form eines Kennfeldes hat, welches die Ausgangsgröße/n direkt oder indirekt enthält, und bei dem im Schritt f) ein oder mehrere gespeicherte Werte verändert werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, bei dem die Abbildung der Eingangsgröße/n auf die Ausgangsgröße/n durch einen Neuronales-Netz-Algorithmus erfolgt.

15. Verfahren nach Anspruch 14, bei dem die Ausgangsgröße durch Verknüpfung eines die abgespeicherte Abbildungsinformation repräsentierenden Stützwertevektors ( $\Theta$ ) und eines von der/den Eingangsgröße/n abhängigen Aktivierungsvektors ( $A$ ) gebildet wird.

16. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem die Verknüpfung linear ist, und insbesondere die Form eines Skalarprodukts hat.

17. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, bei dem der Aktivierungsvektor ( $A$ ) normiert ist und nur vom Abstand der Eingangsgröße/n zu den Stützstellen abhängt, die der Vektordarstellung zugrundeliegen.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 17, bei dem die Abbildung der Eingangsgröße/n auf die Ausgangsgröße/n im wesentlichen lokal ist.

19. Verfahren nach Anspruch 18, bei dem nur diejenige/n Komponente/n des Aktivierungsvektors ( $A$ ) nennenswert große Werte erhält/erhalten, die im geringem Abstand zu der/den Eingangsgröße/n liegt/liegen, während Komponenten in größerem Abstand vernachlässigbar klein sind oder verschwinden.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 19, bei dem die Komponenten  $A_i$  des Aktivierungsvektors ( $A$ ) vom Abstand  $d_i$  der Eingangsgröße/n zu der zugehörigen Stützstelle  $i$  gemäß einer Zentrumsfunktion, insbesondere

$$A_i \sim e^{-\frac{1}{\sigma} d_i} \text{ oder } A_i \sim \frac{1}{1 + \sigma \cdot d_i^2}$$

abhängen, wobei  $\sigma$  ein Breitenparameter ist.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 20, bei welchem die Veränderung der Abbildungsinformation im wesentlichen in dem Bereich des Abstands von einer Abweichungsstelle erfolgt, der auch in die Abbildung der an dieser Stelle liegende/n Eingangsgröße/n auf die Ausgangsgröße/n einbezogen würde.

22. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 21, bei dem die Veränderung der Abbildungsinformation im wesentlichen lokal zur Abweichungsstelle erfolgt.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 22, bei dem die Veränderung der Abbildungsinformation erfolgt, indem zu dem Stützwertevektor ( $\Theta$ ) ein Stützwertekorrekturvektor ( $\Delta\Theta$ ) addiert wird, welcher einer Verknüpfung, und zwar insbesondere dem Produkt des Abweichungswerts ( $e$ ) mit dem Aktivierungsvektors ( $A$ ) proportional ist.

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 23, bei dem die Adaption der gespeicherten Abbildungsinformation bzw. der Lernprozeß mit einem Adaptionsgesetz mit Stabilität und Parameterkonvergenz geschieht.

25. Vorrichtung zur Gemischsteuerung bei einem Verbrennungsmotor, umfassend:

- a) wenigstens eine Einrichtung zur Messung wenigstens einer Größe, mit der die in einen Brennraum des Verbrennungsmotors gelangende Luftmasse im Zusammenhang steht (sog. Eingangsgröße);
- b) wenigstens eine Stelleinrichtung zum Zuführen von Kraftstoff;
- c) wenigstens eine Einrichtung zur Messung einer Größe, die Information über das so entstandene Gemisch oder dessen Verbrennung trägt (sog. Istgröße);
- d) wenigstens einen Speicher zur Aufnahme der veränderlichen Abbildungsinformation;
- e) und einen zur Ausführung des Verfahrens nach Anspruch 1 programmierten und/oder fest verdrahteten Rechner.

26. Vorrichtung nach Anspruch 25, bei dem der Rechner zur Ausführung einer oder mehrerer Ausgestaltungen des Verfahrens gemäß Anspruch 2 bis 24 programmiert bzw. verdrahtet ist.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

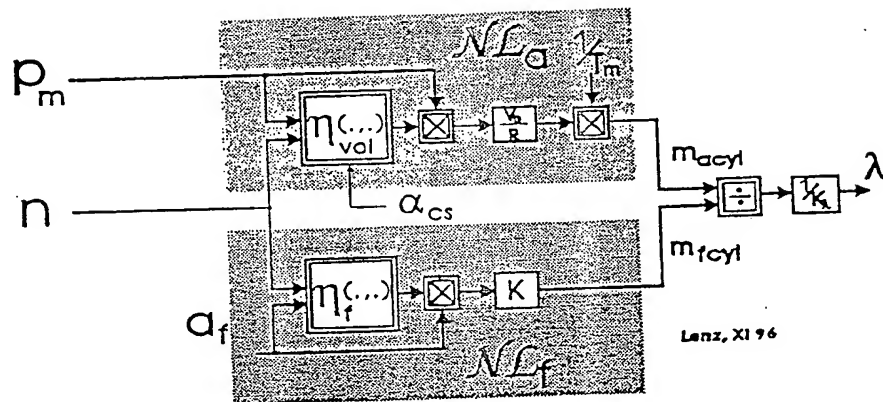


Fig. 1

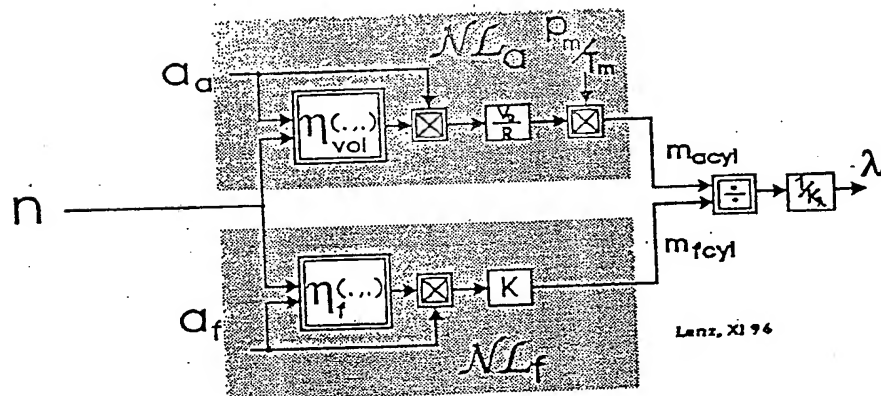


Fig. 2

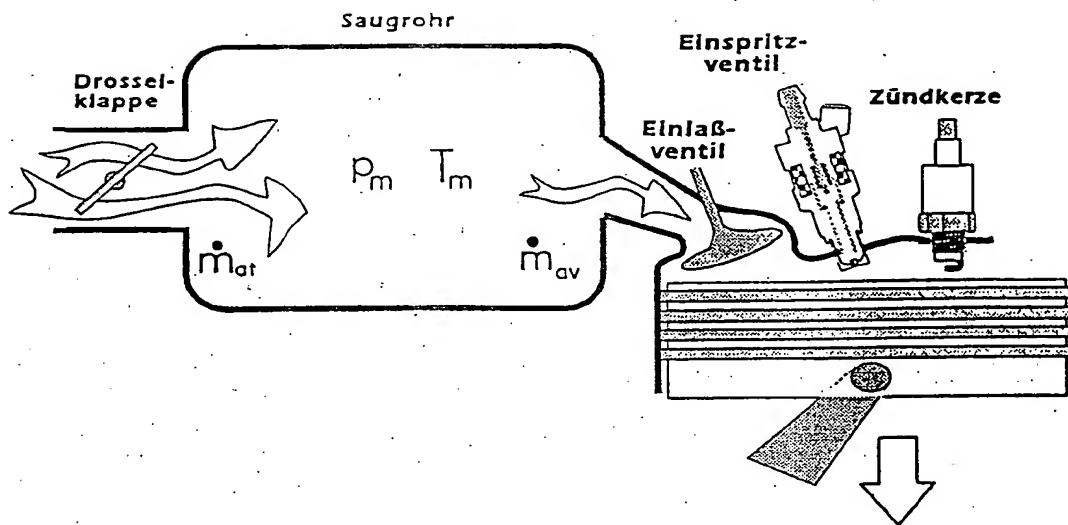


Fig. 3

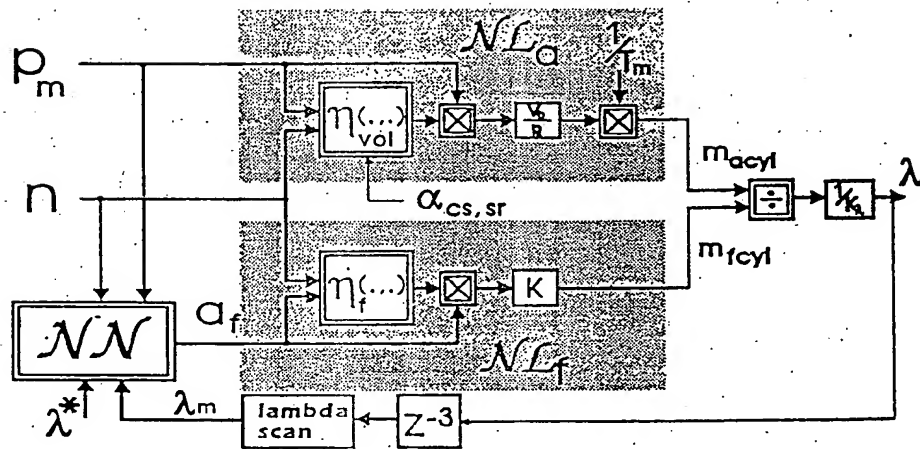


Fig. 4

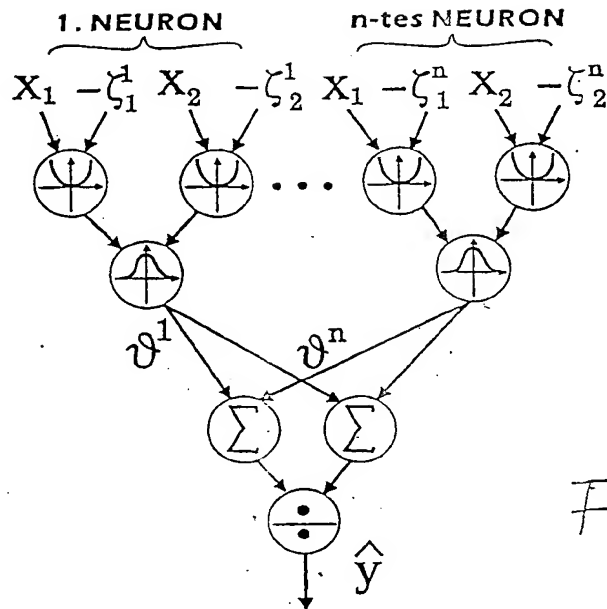


Fig. 5

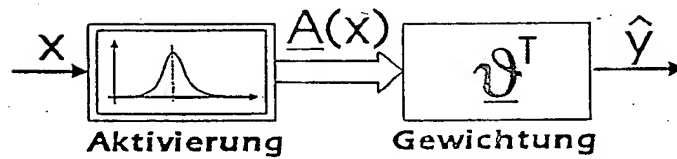


Fig. 6

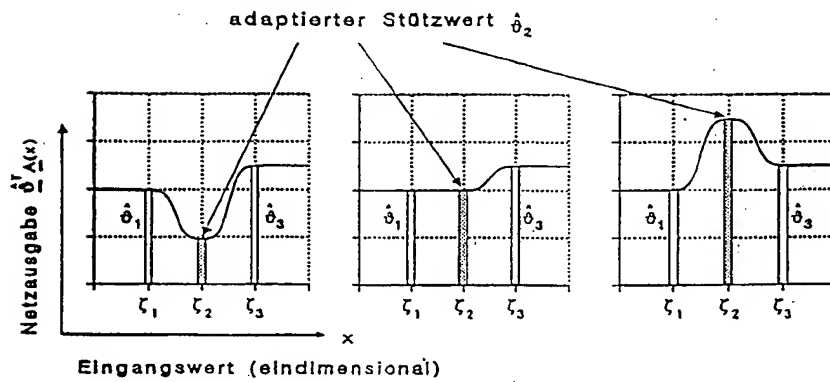


Fig. 7

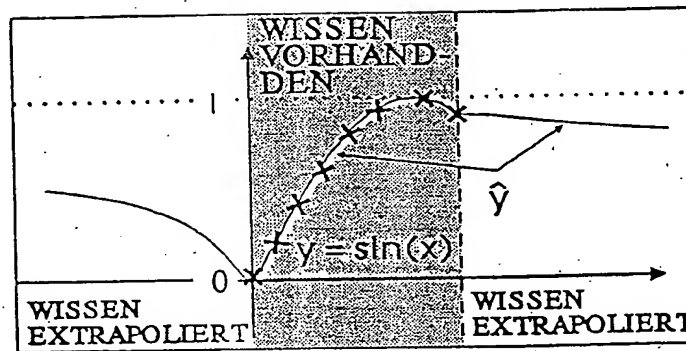


Fig. 8

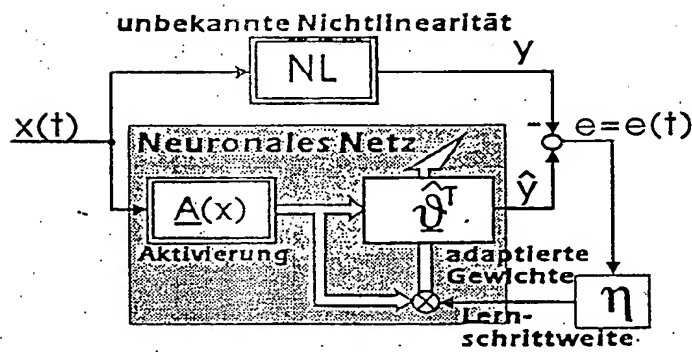


Fig. 9

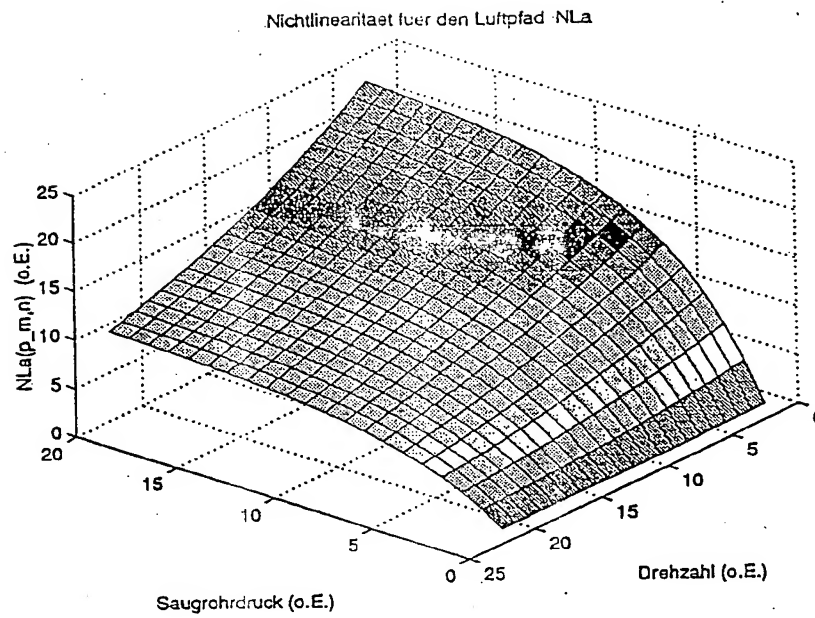


Fig. 10

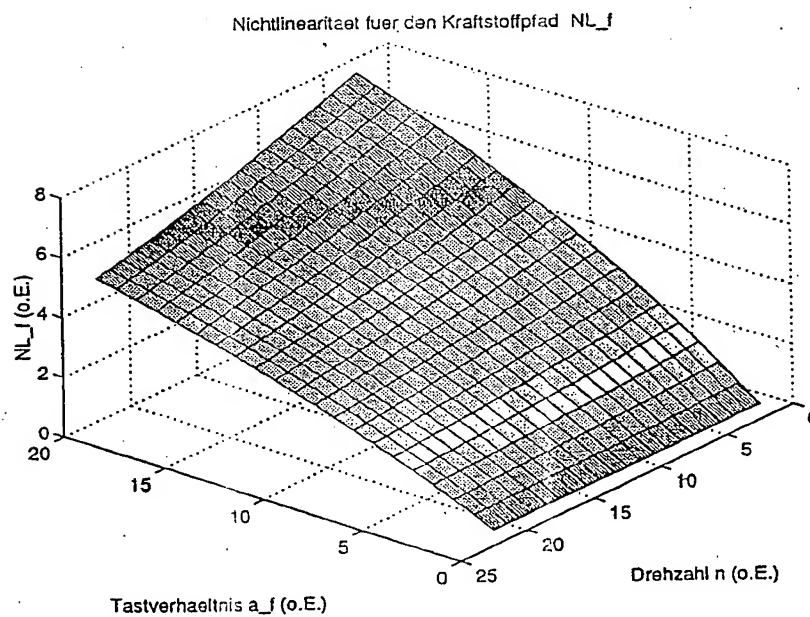


Fig. 11



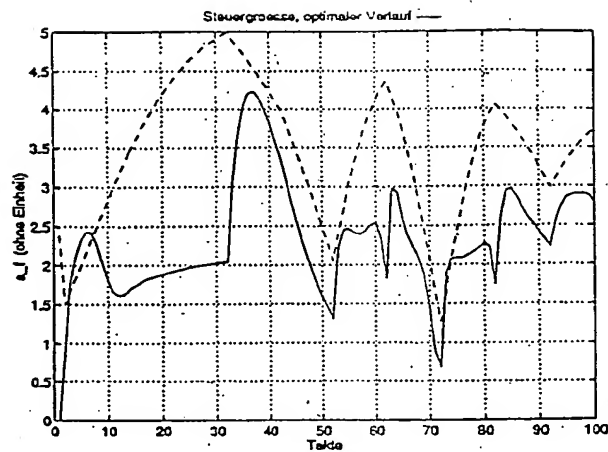


Fig. 12

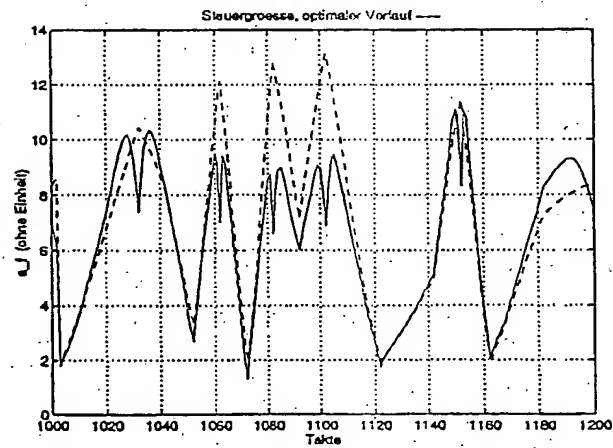


Fig. 13

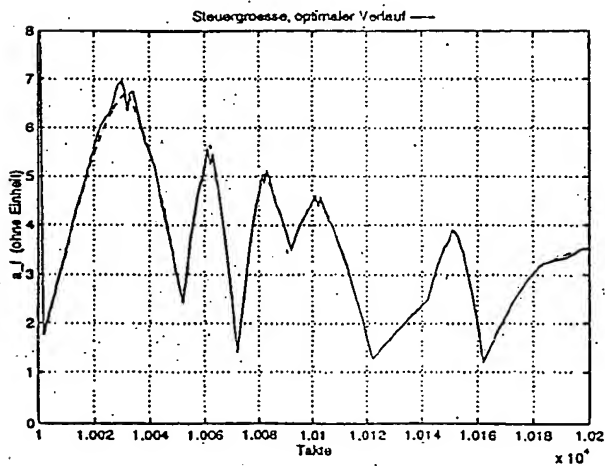


Fig. 14

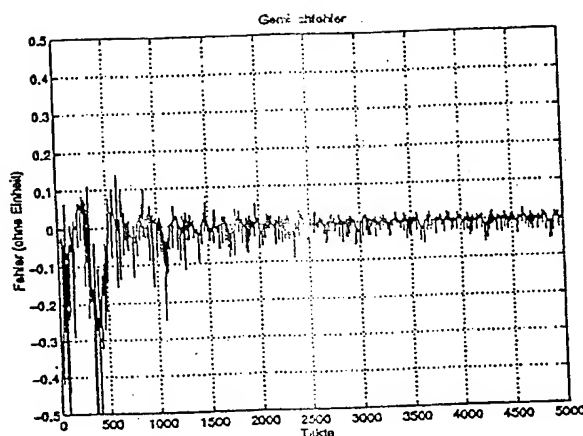
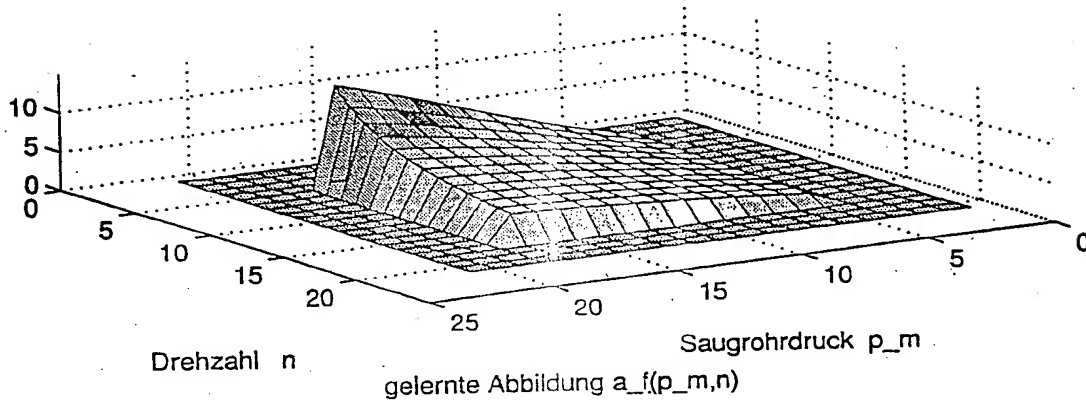


Fig. 15

zu erlernende Abbildung  $a_f(p_m, n)$



gelernte Abbildung  $a_f(p_m, n)$

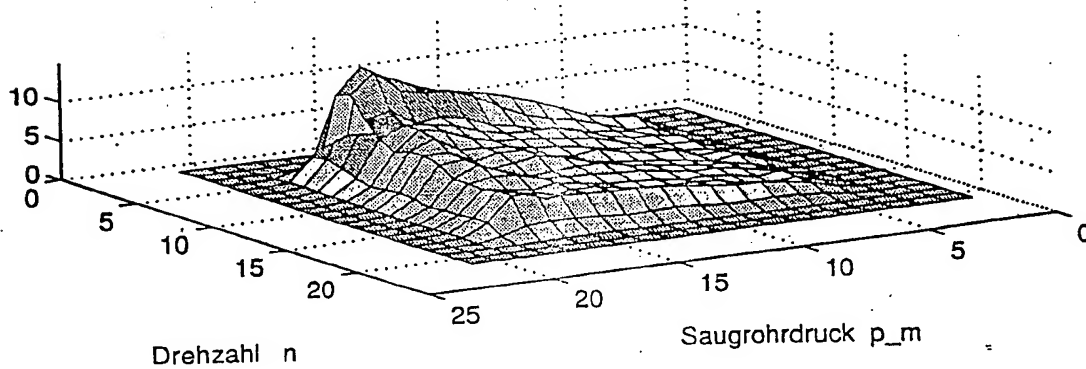


Fig. 16

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**